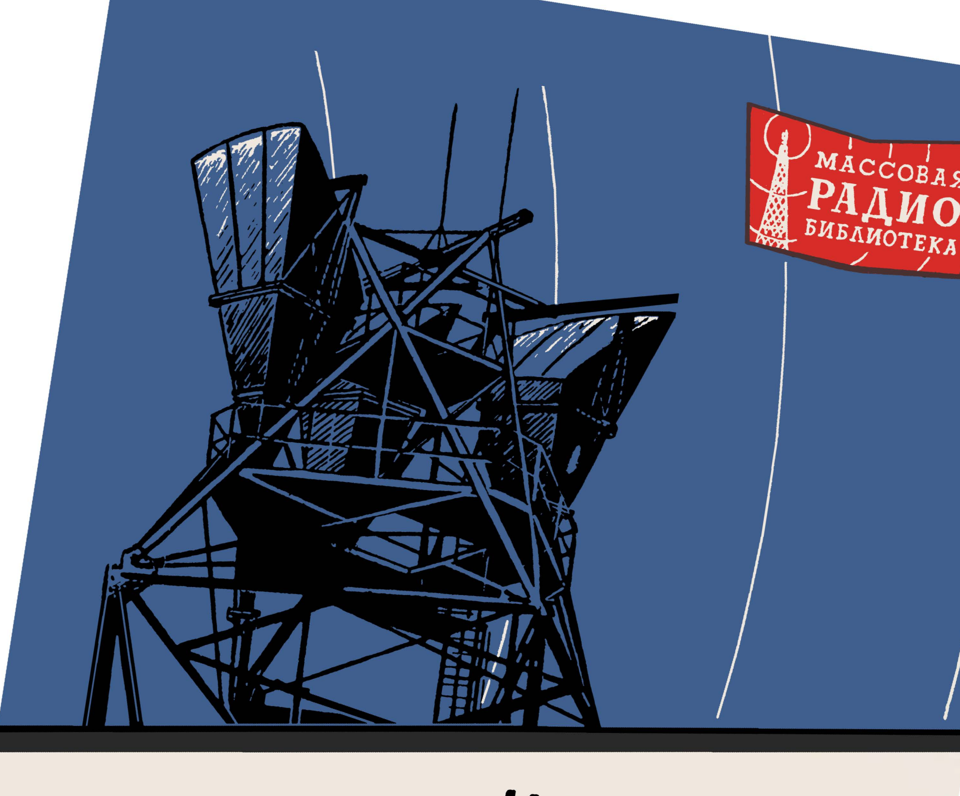


Н. М. Изюмов

Радиорелейная связь

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

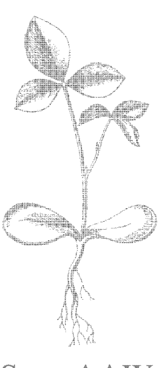
МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

Выпуск 447

Н. М. ИЗЮМОВ

РАДИОРЕЛЕЙНАЯ СВЯЗЬ

Издание второе, полностью переработанное





ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКВА 1962 ЛЕНИНГРАД

В книге излагаются области современных применений радиорелейной связи, состав аппаратуры и принципы работы радиорелейных станций. Описаны возможности осуществления радиорелейной связи с большими интервалами между станциями.

Изложение материала книги рассчитано на подготовленного радиолюбителя.

6Ф2.19 *Изюмов Николай Михайлович*

И32 **Радиорелейные линии.** М.—Л., Госэнергоиздат, 1961. 96 с. с илл. (Массовая радиобиблиотека. Вып. 447). 6Ф2.19

Обложка художника А. М. Кувшинникова

Редактор *Ф. И. Тарасов* Техн. редактор *Н. И. Борунов*

Сдано в набор 1/II 1962 г. Подписано к печати 6/VII 1962 г.
Т-07731 Бумага 84×108[1]/[32] 4,92 печ. л. Уч.-изд. л. 6,9
Тираж 65 000 экз. Цена 28 коп. Зак. 2073

Типография Госэнергоиздата. Москва, Шлюзовая наб., 10.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Радиорелейная связь занимает в настоящее время достаточно утвердившееся положение среди других видов связи. К началу шестидесятых годов ее свойства рассмотрены в многочисленных теоретических исследованиях и проверены широким практическим опытом. Разработаны методы технического проектирования радиорелейных линий и изучена экономика их строительства и эксплуатации. Имеются рекомендации по выбору наивыгоднейших типов аппаратуры и сооружений для линий разных назначений и для разных географических районов.

Развитие в технике радиорелейной связи продолжается и сейчас, и продолжается более быстрыми темпами и более резкими скачками, нежели во многих других отраслях техники. Достаточно напомнить, что применительно к запросам радиорелейной связи были разработаны методы квантизации сигналов, которые дают новые перспективы и в других видах связи. Точно так же на базе радиорелейных систем были поставлены опыты, открывшие возможности связи на большие расстояния с использованием рассеянного отражения ультракоротких волн в тропосфере и ионосфере. Стремление повысить надежность связи на предельных расстояниях стимулировало разработку усилителей с малыми собственными шумами — ламп бегущей волны и параметрических усилителей. Наконец, запуск искусственных спутников Земли, впервые осуществленный в Советском Союзе, позволил поставить задачу создания сверхдальних радиорелейных линий с участием спутников-ретрансляторов.

Все перечисленные обстоятельства сделали целесообразным выпуск второго издания книги «Радиорелейная связь», которая вошла в состав массовой радиобиблиотеки первым изданием в 1954 г. Книга переработана коренным образом. В ней исключены или резко сокращены вопросы, нехарактерные для радиолиний последних лет, и внесены сведения о современных и перспективных видах аппаратуры.

Автор

СОДЕРЖАНИЕ

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ПРИНЦИПЫ РАДИОРЕЛЕЙНОЙ СВЯЗИ И ДИАПАЗОНЫ ВОЛН

Понятие «радиорелейная связь» можно противопоставить понятию «прямая радиосвязь». В случае прямой связи радиосигналы одного корреспондента непосредственно принимаются другим корреспондентом. В случае же радиорелейной связи сигналы одного корреспондента принимаются, усиливаются и автоматически переизлучаются в сторону другого корреспондента поочередно промежуточными (так сказать, вспомогательными) станциями, размещенными на трассе между корреспондентами. Обе оконечные станции и одна или несколько промежуточных образуют в целом радиорелейную линию. Это последнее наименование происходит от английского слова «relay», т. е. смена (подобно смене паровозов на участках пути поезда). Процесс приема, усиления и переизлучения сигналов называется ретрансляцией, вследствие чего промежуточные станции носят название ретрансляционных. Условное изображение радиорелейной линии представлено на рис. 1.

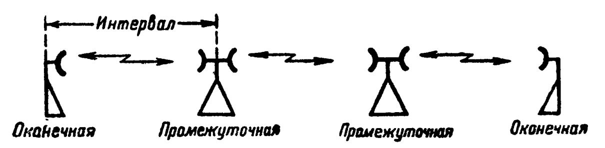


Рис. 1. Условное изображение радиорелейной линии.

Чем же диктуется необходимость установки промежуточных станций, если известно, что прямая радиосвязь в принципе осуществима между двумя любыми точками земного шара? Дело в том, что для радиорелейных линий целесообразно применять только сверхвысокие частоты, т. е. ультракороткие (сантиметровые, дециметровые и, значительно реже, метровые) волны. Основной поток энергии этих волн распространяется прямолинейно, почти не огибая выпуклости земного шара и местных препятствий и не преломляясь в ионосфере (за исключением «длинных» метровых волн). Значит, маломощные радиостанции сверхвысоких частот позволяют держать связь только при наличии прямой (геометрической) видимости между антеннами корреспондентов, т. е. при

отсутствии преград на прямой линии, соединяющей антенны. Отсюда понятно, что для осуществления связи на расстояния, превосходящие дальность прямой видимости, необходимо устанавливать на трассе промежуточные (ретранслирующие) станции.

Такое усложнение радиолинии оправдывается большими преимуществами ультракоротковолновой радиосвязи по сравнению с коротковолновой или длинноволновой.

Первое — возможность передачи по линии значительно бóльшего потока сообщений (например, получение многих телефонных каналов). Это будет понятно, если учесть, что число каналов пропорционально ширине полосы пропускания, а она в свою очередь приблизительно пропорциональна несущей частоте радиолинии, т. е. обратно пропорциональна длине волны.

Второе преимущество ультракоротких волн — высокая направленность действия их антенн в сторону корреспондента. Направленность зависит от соотношения размеров антенного устройства с длиной волны. Значит, дециметровые и сантиметровые волны позволяют сосредоточить излучение и прием сигналов в узком пучке при сравнительно небольших размерах антенных устройств. Благодаря этому передатчики радиорелейных линий имеют малую мощность (единицы ватт), а воздействие внешних помех на приемники ослабляется настолько, что почти единственным источником помех являются внутренние шумы приемника.

Наконец, еще одним достоинством связи на ультракоротких волнах при наличии прямой видимости следует признать устойчивость ее, т. е. постоянство уровня сигнала в приемнике вне зависимости от часов суток, времени года и других внешних условий.

Благодаря перечисленным свойствам радиорелейные линии могут в технико-экономическом отношении сопоставляться с кабельными линиями проводной связи. Достижимая пропускная способность радиорелейной линии сантиметровых волн не уступает пропускной способности магистральной линии коаксиального кабеля: обе линии могут «уплотняться» не только сотнями, но и тысячами телефонных каналов или же передавать телевизионную программу. Телефонный канал радиорелейной линии по своему качеству, т. е. отсутствию искажений и помех и постоянству уровня сигнала, может удовлетворять столь же высоким требованиям, как и канал лучшей кабельной линии.

Оборудование промежуточных станций радиорелейной связи значительно сложнее, нежели оборудование усилительных пунктов кабельной линии. Но на коаксиальной кабельной линии усилительные пункты располагаются через 6 *км*, тогда как интервалы между радиорелейными станциями (при достаточно высоких антенных опорах и выгодных точках их размещения) могут быть в среднем по 50—60 *км*; значит, на длинной трассе их будет примерно в 10 раз меньше, нежели кабельных усилительных пунктов. Мощность электропитания радиорелейной линии больше, чем кабельной.

Очень серьезным преимуществом радиорелейной связи следует считать экономию цветных металлов — меди и свинца, составляющих главный расход материалов для кабеля.

Наконец, строительство радиорелейной линии может быть выполнено в более короткий срок и дешевле, чем кабельной. Это преимущество становится особенно крупным при строительстве линии связи

через болотистую, скалистую местность или через водные преграды, где стоимость прокладки кабеля велика.

На рис. 2 изображена структурная схема радиорелейной линии с одной ретрансляцией (иначе говоря, на два интервала). Каждая оконечная станция этой линии состоит из передатчика и приемника, работающих непрерывно, т. е. позволяющих вести одновременно передачу и прием. Потребность в такой «дуплексной» связи для многоканальных линий вполне очевидна, хотя бы по тем элементарным соображениям, что из абонентов данной оконечной станции одни в данный момент говорят, а другие слушают. Передача и прием производятся на разных частотах (волнах), благодаря чему передатчик данной станции не мешает работе ее приемника. Антенны для передачи и приема изображены на рис. 2 отдельными, хотя иногда они выполняются конструктивно в общем отражателе.

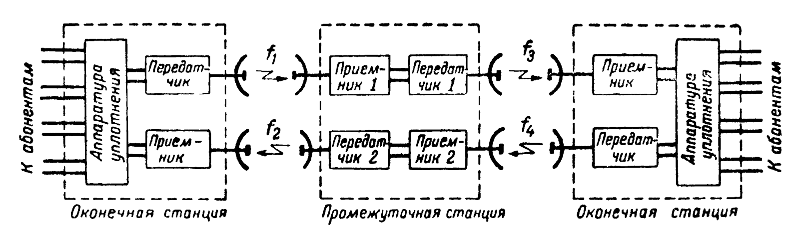


Рис. 2. Радиорелейная линия с одной ретрансляцией.

В состав оконечных станций входит аппаратура уплотнения, к которой через коммутатор подводятся цепи абонентских телефонов. Разговорные токи абонентов преобразуются аппаратурой уплотнения в общий сигнал, который модулирует колебания передатчика. Принимаемые колебания в результате детектирования в приемнике также создают общий сигнал, преобразуемый аппаратурой уплотнения в разговорные токи, которые разделяются по соответствующим абонентским цепям.

Промежуточная станция имеет в своем составе два передатчика и два приемника (для двух направлений обмена). Приемник *1* настроен на частоту f_1 приходящего сигнала. Принятый сигнал усиливается и управляет без участия оператора передатчиком *1*, который излучает тот же сигнал, но на частоте f_3, в сторону второй оконечной станции. Приемник 2 настроен на частоту f_4 сигнала, приходящего справа, и управляет передатчиком *2*, переизлучающим тот же сигнал на частоте f_2.

Частóты, на которые настроены передатчики и приемники радиорелейной линии, выбираются из общего диапазона частот данного типа аппаратуры с таким расчетом, чтобы разница между частотами передачи и приема каждой станции была достаточна для подавления фильтрами приемника помех от своего передатчика. Что касается диапазонов частот радиорелейных станций, то по международным соглашениям для Европы установлены в области дециметровых волн участки 460—470, 1 300—1 600 и 1 700—2 300 *Мгц*, а в области сантиметровых волн — участки 3 500—4 200, 4 400—5 000, 5 925—8 500 и 9 800—10 000 *Мгц*. Более длинные (метровые)

волны могут найти применение только для радиолиний с малым числом каналов при необходимости связи на «закрытых» трассах, т. е. без прямой видимости между антеннами соседних станций, так как эти волны еще способны огибать небольшие препятствия. Волны же короче 3 *см* (выше 10 000 *Мгц*) для наземных связей большой протяженности невыгодны из-за поглощения их энергии в каплях дождя (а для еще более коротких волн — и в молекулах газа).

Из перечисленных выше участков частот выбираются те, которые обеспечивают полосу пропускания, достаточную для заданного числа каналов. Однако это соображение для выбора диапазона частот радиорелейной аппаратуры — далеко не единственное.

Приходится учитывать возможности выбора электровакуумных приборов, удобства конструктивного выполнения аппаратуры и другие технико-экономические факторы.

Достаточно указать, что переход от дециметрового диапазона частот к сантиметровому потребовал предварительного решения многих сложных задач. Например, каскады, генерирующие и усиливающие колебания дециметрового диапазона, выполняются на триодах (металлокерамических или маячковых). Эти лампы уже не годятся для сантиметровых волн. Только применением клистронов и ламп бегущей волны была решена проблема электровакуумных приборов для радиорелейных линий сантиметрового диапазона.

Высокий коэффициент усиления антенных устройств, зависящий от направленности их действия, легче достижим на сантиметровых волнах, нежели на дециметровых; при заданном же его значении размеры антенн сантиметровых волн получаются меньшими, что выгодно в смысле ветроустойчивости. Действительно, если представить себе, что основной «пучок» излучения антенны лежит в пределах телесного угла в 1—2°, то станет очевидной необходимость строгой ориентировки антенны на корреспондента; вместе с тем угол ветровых колебаний антенны должен быть еще меньше, что легче осуществить при малых размерах антенного устройства.

Но эти преимущества сантиметрового диапазона сопровождаются трудностями в осуществлении связи антенных систем с приемно-передающей аппаратурой. Известно, что на метровых и на дециметровых волнах практикуется соединение антенны, расположенной на вышке, с аппаратурой, находящейся на земле, с помощью коаксиального кабеля. Возможно и более простое соединение — при помощи однопроводной «линии поверхностной волны».

На рис. 3 представлены переходное устройство от коаксиального кабеля к однопроводной линии и выходящий из этого устройства провод линии. Устройство представляет собой металлический рупор, соединенный с внешней оболочкой кабеля и закрытый сверху диэлектрическим конусом для защиты от осадков, а однопроводная линия продолжает центральный провод кабеля.

Но на сантиметровых волнах потери энергии в коаксиальном кабеле и в однопроводной линии столь значительны, что применение таких фидеров становится менее выгодным. Антенны сантиметровых волн можно соединять с аппаратурой при помощи волноводов. Волноводный фидер оказывается легко выполнимым в стационарных радиорелейных устройствах, которые на каждой станции имеют специальную металлическую или бетонную башню высотой до 100 *м* с помещением для аппаратуры и антенными площадками наверху.

На рис. 4 представлен разрез подобной башни: подвальный ее этаж занят под хранилище горюче-смазочных материалов, а первый — под дизельную электростанцию (обычно существующую в качестве резерва); предпоследний этаж отведен под выпрямители и распределительные устройства; в верхнем этаже находится приемно-передающая аппаратура, а на площадке — антенные устройства. Волноводы между верхним этажом и антеннами получаются короткими.

Если опорой для антенн служит металлическая мачта, а аппаратура размещается внизу, то применяется так называемая перископическая система питания, устраняющая потребность в длинных фидерах. На рис. 5 показан состав и принцип действия перископической системы, предложенной для советских радиорелейных линий В. Д. Кузнецовым. При работе на передачу рупорная антенна, расположенная в здании рядом с аппаратурой и соединенная с ней при помощи очень короткого фидера, посылает радиоволны на поверхность нижнего металлического зеркала, имеющего небольшую вогнутость. Это зеркало размещено под мачтой и наклонено под углом 45° к горизонту. Оно отражает радиоволны вверх и создает концентрацию их энергии на поверхности плоского зеркала, укрепленного на мачте и наклоненного тоже под углом 45° к горизонту. Волны отражаются еще раз и направляются над земной поверхностью в сторону корреспондента. Следовательно, принцип действия такой системы сходен с действием оптического перископа. При радиоприеме в подобном устройстве лучи радиоволн имеют обратные направления: от корреспондента на верхнее зеркало, затем на нижнее и в раскрыв рупора.

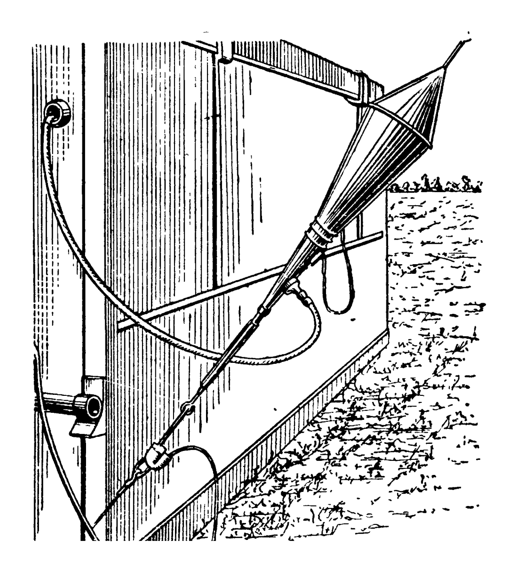


Рис. 3. Переходное устройство к однопроводной линии.

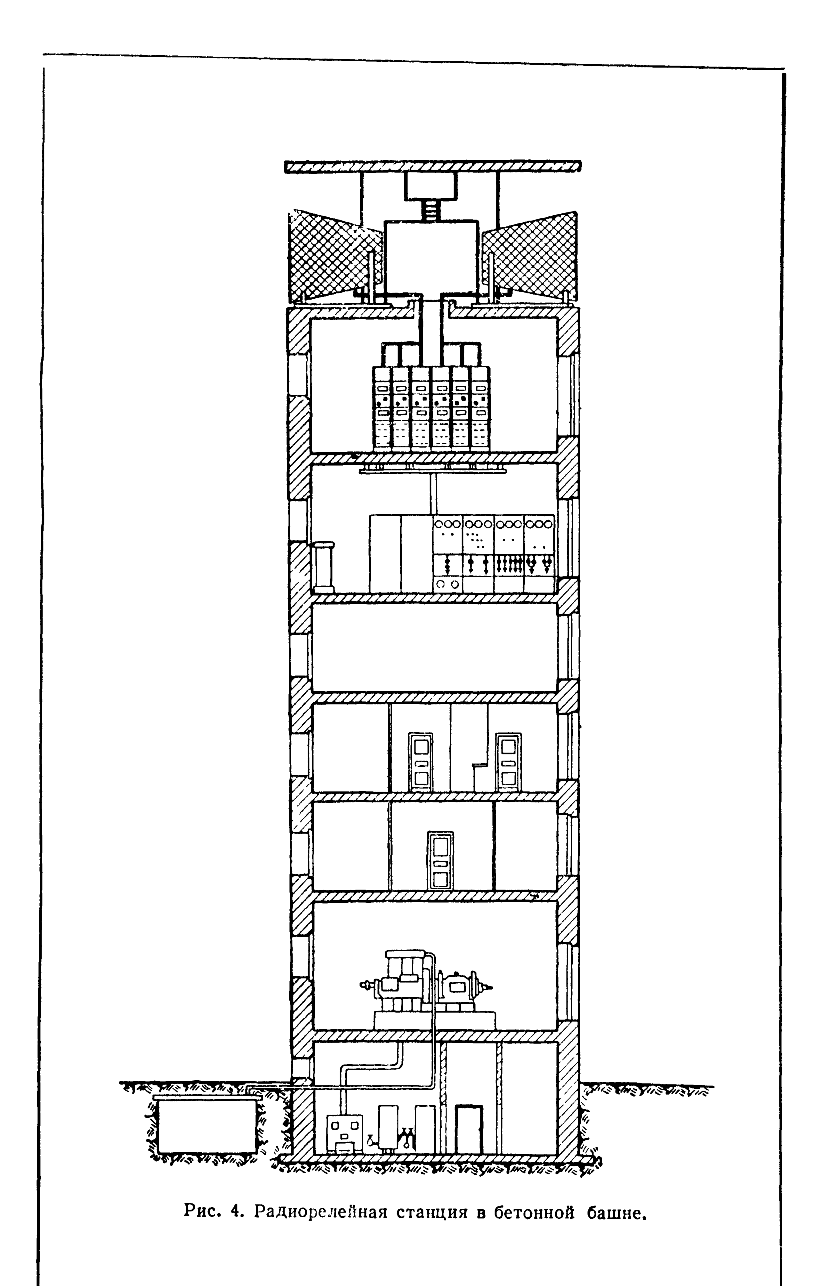
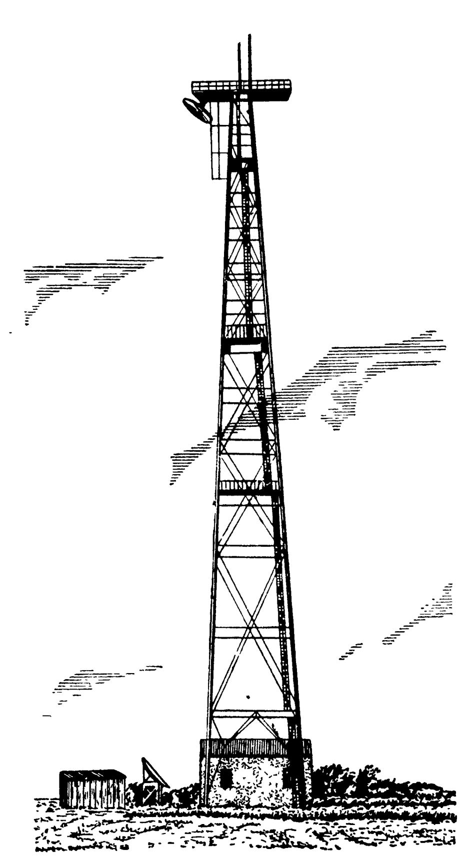


Рис. 4. Радиорелейная станция в бетонной башне.



Таковы самые основные соображения по выбору диапазона волн для радиолиний. Однако не прекращаются поиски возможностей освоить для целей связи диапазоны волн короче 3 *см*. Так, например, фирма Бэлл (США) выпускает радиорелейную линию на частоте 11 000 *Мгц* ($\lambda < 3$ *см*). Но эта линия рассматривается только как дополнение к перегруженным местным кабельным соединениям для передачи телефонных и телевизионных сигналов на короткие расстояния. Характерно, что на 36-километровой трассе этой линии обнаруживается заметное ухудшение отношения сигнала к шуму во время дождя.

Уже в течение ряда лет изучается возможность свя-

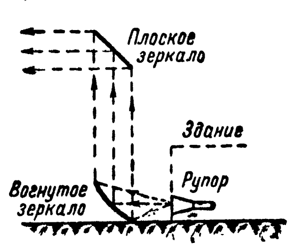


Рис. 5. Перископическая антенная система и принцип ее действия.

зи на еще более коротких волнах, но распространяющихся не в открытом пространстве, а внутри волновода круглого сечения. В последние годы в зарубежной печати сообщалось о разработке образцов гибкого волновода, изготовляемого из алюминиевой проволоки, которая свертывается в спираль и покрывается герметичной броней для укладки в грунт. Линия предназначается для волн миллиметрового диапазона. Создается такая структура электромагнитного поля этих волн внутри волновода, при которой их распространение происходит с относительно слабыми токами на поверхности внутренней стенки волновода, т. е. с малыми потерями. Линия описываемого типа должна иметь полосу пропускания 80 000 *Мгц* и допускать, следовательно, передачу 400 телевизионных программ или нескольких сотен тысяч телефонных каналов. Вдоль линии должны устанавливаться (с учетом затухания сигналов в волноводе) промежуточные усилители (ретрансляторы) через каждые 32 *км*. Волновод-

ная линия связи может рассматриваться, с одной стороны, как микроволновая разновидность кабельной линии, а с другой стороны, как вариант радиорелейной линии с канализируемым потоком энергии и широчайшей полосой пропускания. Экономическая и технологическая перспективы волноводных линий связи еще не получили всестороннего освещения.

В самое последнее время исследуются возможности многоканальной связи на волнах инфракрасного и светового диапазонов. Эти исследования связаны с открытыми недавно квантовомеханическими генераторами и усилителями.

Напомним читателю в самых кратких словах принцип работы одного из таких усилителей. Рабочим веществом в нем служит кристалл синтетического рубина, т. е. корунда, с примесью ионов хрома. Последние могут иметь три энергетических уровня. В нормаль-

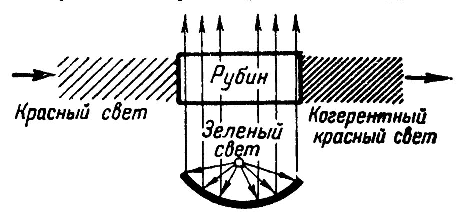


Рис 6. Принцип квантовомеханического усиления света.

ных условиях большинство ионов находится на нижнем уровне. Под воздействием внешнего источника энергии они переходят на верхний уровень, который не является устойчивым. Внешним источником энергии может служить обычный зеленый свет (рис. 6). С верхнего уровня ионы хрома самопроизвольно переходят на средний. Дальнейший переход их со среднего уровня на нижний дает излучение красного света. Но этот последний переход затруднен и происходит только под воздействием внешнего толчка.

Если в кристалл рубина, ионы хрома в котором находятся на среднем энергетическом уровне, ввести слабый луч красного света, то, проходя сквозь кристалл, этот луч будет переводить ионы со среднего уровня на нижний, при этом энергия волны красного света будет увеличиваться за счет излучения собственной энергии ионов. Значит, стержень рубина, используя энергию зеленого света, работает как усилитель красного света.

Усиленный красный свет, частота колебаний которого приблизительно составляет $4 \cdot 10^8$ *Мгц*, обладает замечательным свойством, называемым когерентностью: во всем сечении пучка лучей фаза колебаний одинакова, т. е. лучи параллельны между собой. Это достигается благодаря тому, что каждый ион хрома отдает энергию в виде колебаний, фаза которых жестко связана с фазой волны усиливаемого света.

Практически полной параллельности лучей не достигается, но все же направленность излучения гораздо выше направленности антенн сантиметровых волн. Например, луч из квантовомеханического усилителя имеет на расстоянии 40 *км* диаметр только 70 *м*! Иначе говоря, угол диаграммы направленности исчисляется уже не градусами, а десятками секунд.

Разрабатываются способы модуляции когерентного света многоканальным электрическим сигналом и демодуляции светового луча на приемной стороне. Очень высокая несущая частота света дает возможности передачи огромного потока информации, исчисляемого, например, тысячами телевизионных программ. Но наибольший интерес такая линия представила бы собою для космической связи (за пределами атмосферы), так как в атмосфере поглощение света все же значительно благодаря наличию влаги и частиц пыли.

ГЛАВА ВТОРАЯ

ИНТЕРВАЛЫ МЕЖДУ СТАНЦИЯМИ. ДАЛЬНИЕ СВЯЗИ НА СВЧ

Станции «прямой видимости»

В экономике строительства и эксплуатации радиорелейных линий имеет, естественно, важнейшее значение вопрос о величине интервалов между станциями. Как было указано выше, нормальным требованием является наличие прямой видимости между антеннами соседних станций. С увеличением расстояния неизбежным препятствием для прямой видимости оказывается выпуклость земного шара, имеющего радиус около 6 000 *км*. Вполне понятно, что станции могут быть расположены тем дальше друг от друга, чем выше подняты их антенны. В случае идеально шарообразной поверхности Земли при одинаковой высоте подъема антенн h (в метрах) расстояние прямой видимости между ними (в километрах) ограничено величиной $d \approx 7{,}2\sqrt{h}$.

Например, антенные вышки по 49 *м* обеспечат прямую видимость для расположенных на них антенн на расстоянии $d \approx 7{,}2\sqrt{49} = 51$ *км*. Если высоту h удвоить, то расстояние увеличится только в 1,4 раза, тогда как стоимость сооружений возрастает резко. Практически антенные опоры строятся с высотой до 100 *м*. Расстояние прямой видимости в реальных условиях считают в среднем 40—60 *км*.

Условия радиопередачи существенно изменяются при наличии между соседними станциями гор, холмов, возвышенностей, а также леса, насыпей, построек и т. д. Если подобные препятствия преграждают линию прямой видимости, т. е. «закрывают» трассу, то они могут быть причинами нарушения связи или ослабленного прохождения сигналов. Если же для установки антенн использовать возвышенности, то интервалы можно увеличить. Например, известны радиорелейные линии, станции которых размещены на гористых берегах пролива на расстоянии 110—150 *км* друг от друга, имея прямую видимость и обеспечивая на волнах дециметрового диапазона нормальную связь при передатчиках малой мощности. Вместе с тем установка антенн на возвышенностях позволяет уменьшить высоту опор и тем ускорить строительство и снизить его стоимость.

Отсюда понятна техническая и экономическая целесообразность тщательного топографического исследования трассы радиолинии. Неправильно было бы считать, что кратчайшая трасса всегда будет наивыгоднейшей. Наоборот, иногда пересеченная местность

вынуждает располагать станции зигзагом, позволяющим обойти преграды или воспользоваться высотами для установки станций.

Топографическое исследование трассы будущей радиорелейной линии начинается с выбора на карте пунктов удобного размещения станций при нормальных для данного типа аппаратуры интервалах прямой видимости. Удобство размещения заключается в наличии путей подъезда, близости к сетям энергопитания и в выполнении других условий, предъявляемых организацией строительства и эксплуатации линии.

Затем каждый из намеченных интервалов трассы проверяется на наличие прямой видимости при допустимой высоте антенных опор. С этой целью на́ карте проводится прямая между пунктами,

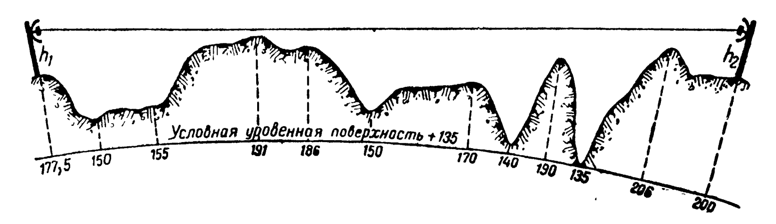


Рис. 7. Пример профиля участка радиорелейной линии.

выбранными для размещения двух соседних станций, и по отметкам на горизонталях, пересекаемых прямой, вычерчивается профиль участка трассы.

В связи с тем, что высо́ты антенных опор или неровностей местности обычно очень малы по сравнению с расстояниями между станциями, удобно вертикальный масштаб профиля увеличить в несколько раз по отношению к горизонтальному. На рис. 7 представлен примерный вид профиля участка трассы, выполненного с учетом кривизны Земли и с условным началом отсчета высот от отметки +135 *м*. Рисунок показывает, что при высотах антенных опор h_1 и h_2 в данном случае прямая видимость между антеннами обеспечена.

Для снижения стоимости эксплуатации стационарных радиорелейных линий бо́льшая часть промежуточных станций полностью *автоматизируется* и работает *без обслуживающего персонала*. Обслуживание имеется на оконечных станциях, а при большой протяженности линии — также и на *узловых* (главных) станциях, которые дают возможность ответвлять часть каналов на телефонные станции близлежащих крупных населенных пунктов.

Наиболее простой вид необслуживаемой промежуточной станции — *пассивный ретранслятор* (рис. 8). Если трасса радиолинии пересекает горный хребет, на вершине которого установка активной промежуточной станции представляет большие трудности, то около вершины устанавливают антенны с большим коэффициентом усиления, связанные кабелем. Одна антенна должна иметь прямую видимость на предыдущую активную станцию, а другая — на последующую, расположенную за горным хребтом. Расстояния между станциями берутся меньше обычных для данной линии интервалов, так как пассивный ретранслятор не имеет усилителей. Но зато он не требует и источников электропитания.

Опытом была установлена возможность прямой связи через преграду в виде горной вершины или хребта клиновидной формы (рис. 9). Физически в этом процессе дифракции (огибания радиоволной преграды) основную роль играет острый край преграды. Не исключается возможность создать искусственную пассивную ретрансляцию, используя данный принцип в том случае, когда сама преграда не имеет клиновидной формы. На вершине преграды устанавливается металлическое полотно, действие которого сходно с эффектом клиновидного хребта.

Применение необслуживаемых, в том числе и пассивных промежуточных станций снижает стоимость эксплуатации радиорелейной линии и упрощает ее обслуживание. Однако такие станции не

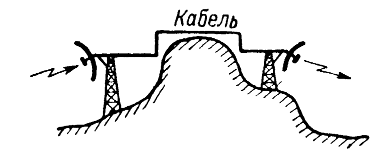


Рис. 8. Пассивная ретрансляция с двумя антеннами.

Рис. 9. Связь через клиновидную преграду.

могут коренным образом упростить задачу обеспечения связи через малонаселенную местность, где вопросы подвоза строительных материалов и оборудования, а также вопросы энергоснабжения и ремонта решаются с очень большими трудностями. Вместе с тем пустынные или малонаселенные районы не предъявляют спроса на большое число ответвляемых каналов на промежуточных станциях.

Для обычных радиорелейных систем уже совсем неразрешима задача установления связи через большие водные, например океанские и морские, пространства между континентами, между островами и т. п., где расстояния исчисляются сотнями километров.

В перечисленных случаях, желая сохранить преимущества связи на ультракоротких волнах, т. е. не прибегать к прямой коротковолновой радиосвязи, необходимо изыскать возможности резкого увеличения интервалов между станциями ультракоротких волн. За последнее десятилетие наука открыла такие возможности. Это — дальние связи, основанные на рассеивании радиоволн в тропосфере и ионосфере, дальние связи, основанные на отражении радиоволн от следов метеоров и искусственных отражающих слоев, и, наконец, это — дальние связи с ретрансляцией через искусственые спутники Земли.

Тропосферная связь

Тропосфера, т. е. нижняя часть атмосферы, простирающаяся до 12—15 *км* от земной поверхности, оказывает большое влияние на распространение ультракоротких волн. Причиной такого влияния является неоднородность физической структуры тропосферы, создающая преломление (рефракцию) радиоволн. Показатель преломления воздуха зависит от давления, температуры и влажности. На разных высотах каждая из этих трех физических величин имеет различное значение, вследствие чего изменяется и величина показателя преломления. Нормальному (среднему) состоянию тропосферы

свойственно уменьшение показателя преломления с высотой. Значит, лучи радиоволн в этих условиях теряют свою прямолинейность; они приобретают некоторую выпуклость, обращенную вверх, т. е. огибают земную поверхность. Эта «нормальная» рефракция как бы равноценна некоторому уменьшению выпуклости земного шара, иначе говоря, увеличению его «эффективного» радиуса. Прием ультракоротких волн становится возможным в области земной «тени» данного передатчика, т. е. на закрытой трассе. Однако увеличение интервалов между радиорелейными станциями за счет **нормальной рефракции** лучей незначительно, и при топографическом исследовании трассы не снимаются требования прямой видимости.

Метеорологические условия в тропосфере изменяются как по временам года, так и в течение суток. В соответствии с этим происходят отклонения атмосферной рефракции от нормальных условий

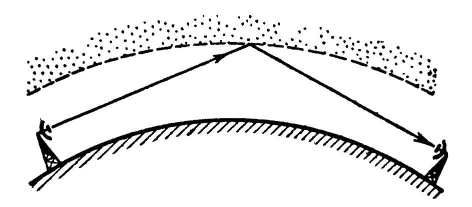


Рис. 10. Отражение от границы неоднородных слоев.

в ту или другую сторону. Если возникает такое распределение влажности, температуры и давления, при котором показатель преломления с высотой увеличивается, то лучи ультракоротких волн приобретают выпуклость, обращенную вниз; тогда и в зоне прямой видимости напряженность поля ослабевает и наблюдается замирание принимаемого сигнала. Это невыгодное для радиорелейной связи преломление радиоволн называется **отрицательной рефракцией**.

Наоборот, если показатель преломления воздуха уменьшается с высотой быстрее, чем при нормальном состоянии атмосферы, то радиоволны могут возвратиться к Земле на расстоянии, значительно превышающем прямую видимость, т. е. будет возможен прием сигналов в области «глубокой тени». Этот случай, называемый **сверхрефракцией**, особенно часто наблюдается над водной поверхностью: влажность воздуха в нижних слоях тропосферы велика и резко убывает с высотой. Значит, условия связи на УКВ через водные пространства благоприятны: связь при отсутствии прямой видимости может поддерживаться в течение бо́льшей части суток, нежели над сушей.

Тропосфера создает особо благоприятные условия распространения ультракоротких волн за горизонт (на расстояния до 300 *км*) при наличии в ней **слоистых неоднородностей**, т. е. резко выраженной границы слоев с разными коэффициентами преломления. Слоистые неоднородности возникают, например, при прохождении фронта холодного воздуха. Радиоволны, падающие на границу разнородных слоев, испытывают отражение (рис. 10). Такое состояние тропосферы делает возможным дальний прием не только теле-

фонных, но и телевизионных сигналов, так как условия отражения достаточно однородны в широкой полосе частот.

Однако прием характеризуется неустойчивостью, претерпевая длительные и кратковременные замирания. Причиной длительных замираний в основном следует считать уменьшение степени неоднородности слоев, снижающее коэффициент отражения. Причиной же кратковременных замираний служит неблагоприятное соотношение фаз волн, приходящих в пункт приема от разных точек отражающей границы, которая изменяется непрерывно по высоте и изменяет длину путей радиоволн. Время длительных замираний может исчисляться, например, десятками минут и часами, а кратковременных — секундами и минутами. Естественно, что длительные замирания, связанные с метеорологией, нерегулярны, а кратковременные, связанные с изменением фазовых соотношений, могут повторяться более или менее периодически. Способы борьбы с обоими видами замираний различны, о чем будет сказано ниже.

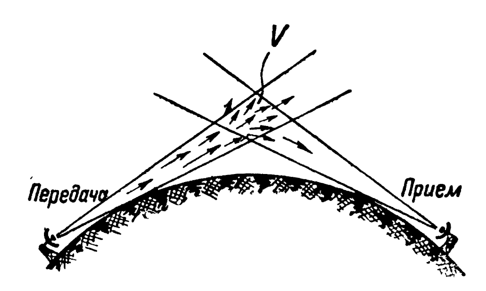


Рис. 11. Рассеяние энергии радиоволн в вихревых неоднородностях тропосферы.

Такие нерегулярные явления, как тропосферная рефракция и отражение от слоистых неоднородностей тропосферы, не могут служить основой для получения устойчивой, надежной связи за пределы горизонта, хотя наличие этих условий делает связь возможной при сравнительно небольших мощностях передатчиков. Однако именно требование устойчивости связи в течение суток и годовых сезонов является важнейшим требованием к радиолиниям ультракоротких волн. И это требование можно осуществить, используя еще одно физическое свойство тропосферы — наличие в ней неоднородностей вихревого происхождения, которые создают рассеяние энергии ультракоротких волн.

Поясним это явление. Благодаря неравномерному нагреванию земной поверхности лучами Солнца возникают движения воздушных масс по горизонтальным и вертикальным направлениям. Столкновения воздушных потоков между собой и с неровностями земной поверхности создают большие вихри, которые распадаются на все более и более мелкие завихрения. Вихревые (турбулентные) движения воздуха образуют области, отличающиеся друг от друга по величинам температуры, влажности и давления. Радиоволны, проходящие через тропосферу с неоднородным строением, рассеивают некоторую часть энергии, причем поток рассеянной энергии направлен преимущественно вперед.

Если в каком-то объеме тропосферы (рис. 11) пересекаются диаграммы направленности антенн корреспондирующих станций, то объем V пересечения этих диаграмм является **объемом рассеяния** энергии, малая доля которой достигает приемной антенны. При приеме поле рассеяния обеспечивает наименьший, но более устойчивый уровень сигнала по сравнению с полями сверхрефракции и отражения от неоднородных слоев. На расстояниях до 300—500 *км* от передатчика поле рассеяния является, по-видимому, основным, хотя и очень слабым переносчиком сигналов.

Для осуществления устойчивой связи с использованием тропосферных неоднородностей требуется выполнить ряд условий. Во-первых, необходимо иметь возможно меньший объем рассеяния V, что достигается узкими диаграммами направленности антенн корреспондирующих станций. Уменьшение объема рассеяния увеличивает мощность рассеяния в направлении приемной антенны. Мы знаем, что острые диаграммы легче получить на дециметровых и сантиметровых волнах, нежели на метровых. Но и на этих волнах размеры антенных устройств требуются значительно бо́льшими по сравнению с антеннами станций «прямой видимости».

Во-вторых, следует учитывать, что в соответствии с указанным выше характером своего происхождения вихревые неоднородности более интенсивно выражены в нижних слоях тропосферы. Чтобы использовать это обстоятельство, необходимо ориентировать диаграммы направленности антенн касательно к Земле (см. рис. 11), располагая антенны так, чтобы пути лучей не пересекались близлежащими преградами (здания, деревья и др.). Но так как прямая видимость между станциями все равно отсутствует, антенны не требуется поднимать на башни. Тем самым несколько облегчается достижение ветроустойчивости антенн, крайне важной при ширине диаграмм направленности, например, около 1°. Практически при этих условиях объем рассеяния над земной поверхностью оказывается на высоте 3—5 *км*.

Примеры антенных устройств для радиостанций тропосферной связи показаны на рис. 12. Обе антенны имеют параболическую вогнутость с излучателем, находящимся в фокусе; у одной из них внешнее очертание круглое, у другой — прямоугольное. Линейные размеры антенн дециметровых волн исчисляются цифрами от 7 до 20 *м*; на сантиметровых волнах эти размеры могут быть меньше.

Третьим условием для осуществления тропосферной связи нужно считать повышенную мощность передатчиков в сравнении с ее значениями для обычных радиорелейных станций. Повышенная мощность увеличивает поток энергии радиоволн в пункте приема. Для работы над сушей применяются передатчики мощностью от 1 до 10 *квт*. Точно также необходима высокая чувствительность приемников, достигаемая использованием усилителей СВЧ на лампах бегущей волны или параметрических усилителей, о которых будет сказано ниже.

Наконец, существенны мероприятия по борьбе с замираниями приема сигналов. Долговременные замирания, вызываемые неблагоприятными метеорологическими условиями на трассе, происходят одновременно во всем районе около пункта приема и в довольно широком диапазоне частот. Говорят в таком случае, что долговременные замирания имеют высокую **корреляцию** (взаимосвязанность) по пространству и частоте. Следовательно, одновременный

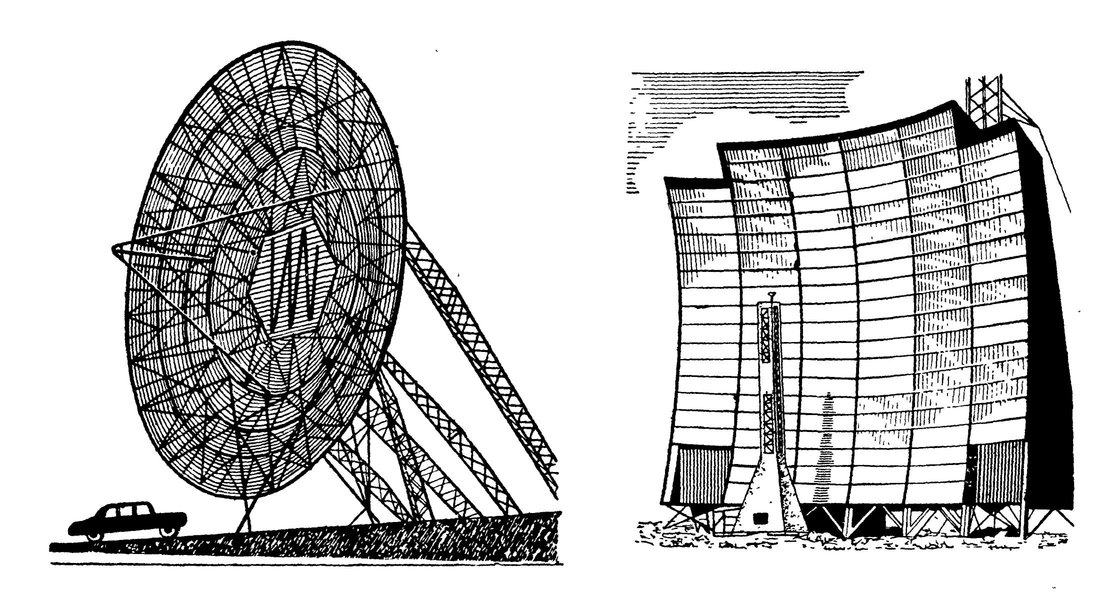


Рис. 12. Антенные устройства тропосферных станций.

прием в разных точках пространства и на разных частотах не улучшает связи. Основной мерой следует считать запас усиления системы, допускающий прием на низшем уровне поля, и ограничение усиления при высоких уровнях.

Кратковременные замирания, обусловленные неблагоприятным соотношением фаз колебаний, доходящих до приемника разными путями, имеют малую корреляцию в пунктах, разнесенных на расстояние в несколько десятков длин волны в направлении, перпендикулярном приходу радиоволн. Этим обстоятельством пользуются в системах тропосферной связи, осуществляя сдвоенный прием с р а з н е с е н и е м в п р о с т р а н с т в е. Две приемные антенны со своими приемниками размещаются на указанном выше расстоянии (в зависимости от длины волны), и принимаемые ими сигналы сочетаются на общем выходном устройстве. Вероятность одновременного замирания в обоих пунктах резко уменьшается, а потому устойчивость связи становится бо́льшей.

Еще более высокие результаты по устойчивости связи достигаются при р а з н е с е н и и сигнала не только в пространстве, но и по ч а с т о т е. В этом случае излучение общего сигнала осуществляется двумя передатчиками, работающими на разных частотах, а прием может быть «счетверенным», т. е. вестись на четыре приемника, разносимые попарно на местности и настраиваемые попарно на разные частоты. Разумеется, выделение на каждый участок радиолинии по четыре рабочих частоты (по две для связи в том и другом направлении) осложняет всю систему связи ростом взаимных помех.

Более экономен по расходу частот, хотя и не столь эффективен в смысле борьбы с замираниями, способ счетверенного приема, использующий разнесение сигналов в пространстве и по п о л я р и з а ц и и. Поляризация радиоволн определяется направлением силовых линий их электрического поля, зависящим от направления излучателя — диполя (или от способа возбуждения излучателя-волновода) в антенном устройстве. Вертикальный диполь излучает (и принимает) волны с вертикальной поляризацией, а горизонтальный диполь излучает (и принимает) волны, поляризованные горизонтально.

Принцип передачи и приема радиоволн, имеющих поляризацию в вертикальной и горизонтальной плоскостях, изображен на рис. 13. Здесь вектор v представляет собой скорость распространения радиоволн, а вектор E — напряженность электрического поля. Очень часто для уменьшения вдвое количества антенных устройств размещают в одном и том же отражателе два взаимно-перпендикулярных излучателя; один из них ведет передачу, а другой ведет одновременно прием. Впрочем, одновременно передачу и прием можно осуществлять и на один диполь, если частоты излучения и приема различны и если между передающей и приемной аппаратурой включен развязывающий фильтр.

На рис. 14 представлены две станции, в каждой из которых выполнен «счетверенный» прием с разнесением в пространстве и по поляризации. Слева направо ведется излучение на частоте f_1 двумя антеннами, в одной из которых излучатель горизонтален, а в другой — вертикален. На правой станции имеется четыре приемника, настроенные на частоту f_1, и две антенны, разнесенные в пространстве. Справа налево излучение ведется на частоте f_2, причем в каждой из антенн по одному диполю предназначено для передачи и

приема одновременно, с развязкой (фильтр Ф) по частоте. На левой станции прием осуществляется на частоте f_2 с участием четырех приемников, тоже разнесенных попарно в пространстве и по поляри-

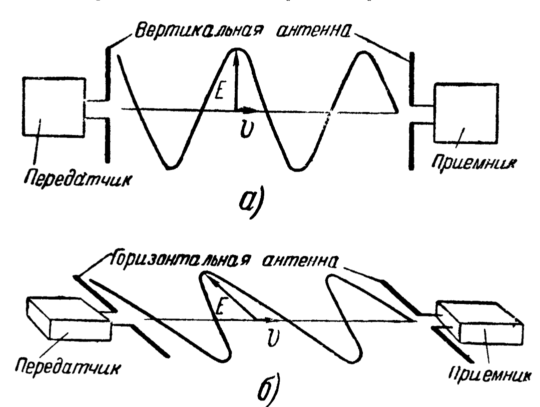


Рис. 13. Передача и прием радиоволн при вертикальной (*а*) и горизонтальной (*б*) поляризации.

зации. Направления передачи — приема указаны пунктирными стрелками.

Следует отметить, что разнесение по поляризации не дает столь значительного эффекта в отношении надежности приема, как разнесение по частоте: опыт показывает, что замирания сигналов при

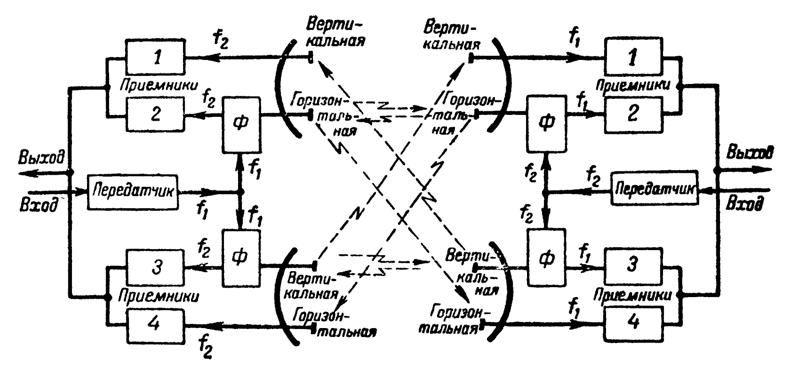


Рис. 14. Структурная схема двух радиорелейных станций, осуществляющих прием с разнесением в пространстве и по поляризации.

одновременной передаче вертикально и горизонтально поляризованных излучений имеют значительную корреляцию. Следует еще отметить, что одновременные излучение и прием на общую антенну в станциях тропосферной связи осуществить труднее, чем в обычных радиорелейных станциях, так как при повышенной мощности пере-

датчика требуется более сложная система фильтрации, защищающей вход приемника от излучения на частоте передатчика.

Радиостанции тропосферной связи, конструируемые с учетом всех перечисленных выше требований, могут образовать радиорелейную линию с большими интервалами и с большой общей протяженностью. Принцип построения линии аналогичен построению, которое было показано на рис. 2. Как указывалось выше, длина интервалов между станциями может быть от 150 до 500—600 *км*. Конкретно эта цифра задается при проектировании аппаратуры с учетом ряда технико-экономических соображений.

Важнейшим из них следует считать ширину полосы передаваемых частот, или, иначе говоря, число каналов телефонного уплотнения. Чем шире заданная полоса частот, тем больше вероятность искажений передаваемой информации. Это объясняется двумя факторами. Во-первых, как известно, мощность собственных шумов приемника пропорциональна ширине полосы пропускания. Во-вторых, рассеянное отражение различных частотных составляющих сигнала приводит к тому, что в пункте приема изменяются их первоначальные амплитудные и фазовые соотношения, что влечет за собой искажение передаваемых сигналов. Особенно сложной с этих точек зрения следует признать передачу по тропосферной линии телевизионной программы, которая занимает полосу частот примерно 6—10 *Мгц*.

Практика строительства тропосферных линий связи показывает, что при уплотнении, не превышающем ста телефонных каналов (т. е. при полосе уплотнения до 0,5 *Мгц*), интервалы ретрансляции устанавливаются по 150—250 *км*. Но линии, создаваемые в малонаселенных (или совсем пустынных) областях, не требуют уплотнения большим числом каналов. И такие «малоканальные» линии возможно и целесообразно строить с интервалами не менее 300 *км*. Заметим, что стремиться получать интервалы более 600 *км* при тропосферной связи не имеет смысла, что определяется указанной ранее геометрической высотой объема рассеяния (3—5 *км*).

Возможность передачи телевизионных программ по линиям тропосферной связи проверена практически на нескольких установках как в Европе, так и в Америке. Линии эти имеют по 1—2 интервала протяженностью по 200—300 *км* каждый. Однако следует отметить, что эти линии проходят преимущественно над теплыми морями, где, как указывалось выше, условия рефракции ультракоротких волн благоприятствуют прохождению сигналов.

Итак, области целесообразного применения обычных и тропосферных радиорелейных линий довольно четко разграничены. Несомненно, что каждая станция тропосферной связи представляет собой более сложное сооружение, нежели обычная. Значительно большее потребление энергии электропитания, более мощные электровакуумные приборы передатчиков, более чувствительные приемники, бо́льшие размеры антенных устройств — все это характеризует отличие тропосферных станций от обычных. Но возможность иметь интервалы ретрансляций увеличенными примерно в 5 раз, т. е., например, устанавливать на тысячекилометровой трассе только 4—5 станций вместо 20—25 дает тропосферной связи исключительные преимущества для малонаселенных или малодоступных областей и для связи через морские пространства.

Ионосферная и метеорная связь

Наибольшие интервалы между станциями, обеспечиваемые системами тропосферной связи, оказываются не всегда достаточными для выполнения требований, которые предъявляет практика к УКВ связи. Так, например, возникает потребность в устойчивой круглосуточной связи между океанскими островами или между континентами, когда расстояние превышает 1 000 *км*. Для передачи сигналов на такие расстояния высота отражающего слоя должна быть не менее 100 *км*, т. е. лежать в области ионосферы.

Ионосферой называют, как известно, ионизированную область атмосферы, начинающуюся от высоты примерно 70—100 *км*. Ионизация вызывается главным образом ультрафиолетовыми лучами солнечного спектра, обладающими достаточной энергией для расщепления молекул газа на положительно заряженные ионы и свободные электроны. Кроме того, Солнце выбрасывает потоки частиц, бомбардирующих земную атмосферу; эти материальные частицы, летящие с огромной скоростью, при столкновении с молекулами газа также создают ультрафиолетовое излучение, ионизирующее воздух.

Ионизированные слои воздуха обладают способностью отражать радиоволны. Эта способность широко используется для осуществления дальних связей на коротких волнах. Но ультракороткие волны (короче примерно 10 *м*) проникают сквозь ионосферу, не отражаясь (за исключением периодов очень высокой солнечной активности); следовательно, для регулярной УКВ связи отражение от ионизированных слоев атмосферы не может быть основой.

Однако в ионосфере, вблизи нижней ее границы, возникают неоднородности в смысле величины ионизации, т. е. количества свободных электронов в единице объема. Происхождение таких неоднородностей объясняют вихревыми движениями воздуха и неравномерностью ионизирующего излучения. Наличие неоднородностей в ионосфере (подобно тропосферным неоднородностям) приводит к рассеянию некоторой небольшой доли энергии радиоволн, идущих сквозь ионосферный слой. И это рассеяние может служить основой для устойчивой УКВ связи при интервалах между станциями примерно от 1 000 до 2 000 *км*. Такие (приближенные) границы дальностей возвращения к Земле энергии радиоволн, рассеиваемой в ионосфере, физически объясняются следующим образом: при более крутом падении на ионизированный слой ультракороткие волны проходят сквозь него с резким уменьшением рассеяния; более пологое падение преграждается выпуклостью земного шара. Процесс ионосферной связи можно иллюстрировать картиной, как на рис. 11, но с соответствующим изменением масштабов дальности и высоты.

Между рассеянием ультракоротких волн в тропосфере и ионосфере имеется следующая принципиальная разница: тропосферное рассеяние создается неоднородностями молекулярных характеристик (температуры, влажности, давления), а ионосферное — неоднородностями ионизационных характеристик (содержания свободных электронов в газе). Преломление в ионосфере происходит вследствие перемещений электронов под воздействием переменного поля радиоволн; но электроны обладают инерцией, и их отклонения уменьшаются с увеличением частоты переменного поля. Вследствие этого эффект рассеяния в ионосфере снижается с укорочением волны. Если же длину волны увеличивать, то, начиная примерно с вол-

ны в 10 *м*, одновременно с рассеянием будет иметь место и отражение, т. е. связь будет характеризоваться неустойчивостью, свойственной коротким волнам. Исследованиями определено, что для связи с использованием ионосферного рассеяния выгодны частоты от 25 до 60 *Мгц* (т. е. участок диапазона метровых волн от 5 до 12 *м*).

Мощность, извлекаемая приемным устройством из рассеянного поля, во много миллионов раз меньше той мощности, какую извлекло бы приемное устройство при той же аппаратуре и той же длине пути, но в свободном пространстве, в условиях «прямой видимости». Поэтому УКВ связь, основанная на использовании ионосферного рассеяния, осуществима при значительных мощностях передатчиков (примерно от 10 до 50 *квт*), при достижимой на метровых волнах остроте направленности антенн и при высокой чувствительности приемников. Кроме того, условия рассеянного распростране-

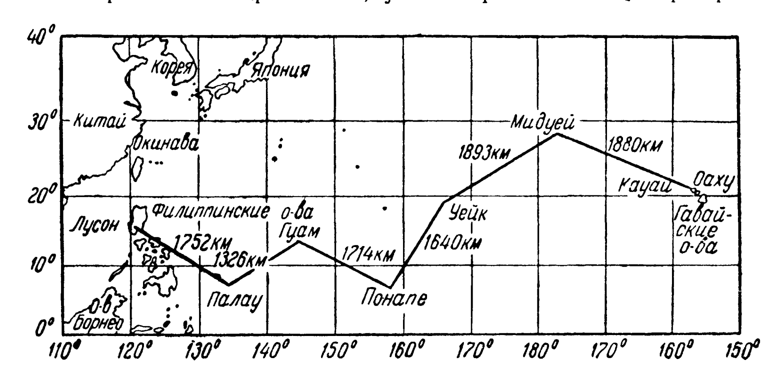


Рис. 15. Тихоокеанская линия ионосферной **связи**.

ния для различных частот в указанном диапазоне могут значительно отличаться между собой, и тем самым резко ограничивается полоса пропускания радиолинии. Эксплуатируемые сейчас линии ионосферной УКВ связи имеют, как правило, один телефонный канал служебного назначения и до 16 телеграфных буквопечатающих каналов (общая полоса которых приблизительно соответствует ширине одного телефонного канала).

Первые линии ионосферной связи были построены в арктических широтах, где они выгодны отсутствием нарушений связи во время ионосферных возмущений. Полярные сияния, которые обычно нарушают связь на коротких волнах, способны усиливать эффект рассеяния ультракоротких волн в ионосфере. Такие линии связывают Америку с Европой через Гренландию, Исландию и Великобританию. Позднее ионосферная связь была создана и в тропическом поясе — между островами Тихого океана (рис. 15). Общая длина этой линии (между Гавайскими и Филиппинскими островами) равна 10 400 *км*. Протяженности отдельных ее участков показаны на рисунке; они составляют от 1 300 до 1 900 *км*. Система, как указывалось в печати, работает круглосуточно без смены волн и с большой надежностью, достигаемой высоким качеством деталей и автоматическим включением резервных узлов аппаратуры при неисправности основ-

ных узлов. Но в существующем виде эту линию нельзя назвать «радиорелейной», так как автоматической ретрансляции на промежуточных станциях она не имеет.

В процессе приема ультракоротких волн, рассеиваемых в ионосфере, время от времени наблюдаются резкие возрастания уровня сигнала. Это явление объясняется отражением метровых волн от ионизированных следов метеоров. В приемнике ионосферной связи приходится вводить ограничение сигнала на некотором нормальном уровне. Однако естественно возникла мысль об использовании метеорных отражений для связи при уменьшенной мощности передатчиков и уменьшенных размерах антенных устройств. Появились системы ультракоротковолновой связи с отражением от ионизированных следов метеоров.

В земную атмосферу из мирового пространства непрерывно вторгается огромное количество мелких твердых частиц — осколков космического вещества. Накаляясь трением о воздух, эти частицы в большинстве случаев испаряются на высоте примерно от 120 до 80 *км*, т. е. близ нижней границы ионосферы. «Метеорами» в строгом смысле слова названы световые вспышки, создаваемые испаряющимися частицами; однако это название обычно относят и к самим частицам. Изредка на Землю падают твердые осколки более крупных космических тел; эти осколки названы метеоритами.

Атомы испаряющейся в воздухе частицы обладают большой энергией, некоторая доля которой расходуется на ионизацию газа. Такой процесс оставляет позади метеора ионизированный «след», рассеивающийся за промежуток времени от десятых долей секунды до нескольких секунд. Средняя длина следа, сохраняющего высокую плотность ионизации, принимается при расчетах равной 25 *км*.

При прохождении радиоволн через ионизированный след электроны последнего начинают совершать колебания с частотой падающих радиоволн и создают вторичное излучение на той же частоте, т. е. служат источником отраженных радиоволн. Это отражение носит зеркальный, а не рассеянный характер, вследствие чего поток энергии отраженных волн при их возвращении к земной поверхности имеет гораздо большую плотность, нежели рассеянных. Так объясняется повышенный уровень сигнала при метеорном отражении.

Геометрическое построение показывает, что дальности метеорной связи примерно совпадают с дальностями связи при ионосферном рассеянии: максимальный интервал составляет 2 000—2 300 *км*. Это будет понятно, если учесть одинаковую высоту метеорных следов и неоднородностей ионосферы. Иллюстрация передачи с использованием метеорного следа дается на рис. 16. Наибольшие эффекты в пункте приема дают отражения от следов метеоров, перпендикулярных плоскости, в которой лежит трасса связи. Что касается диапазона волн, то самыми выгодными оказываются частоты 30—60 *Мгц* (волны длиной от 10 до 5 *м*), хотя можно практически осуществить метеорную связь и на более коротких волнах метрового диапазона (до 3 *м*).

Практически используемые линии метеорной связи имеют, как правило, передатчики мощностью не более 3 *квт* и сравнительно небольшие вибраторные антенны (например, типа «волновой канал»). Значит, в отличие от ионосферных УКВ систем станции метеорной связи могут быть не только стационарными, но и подвижными.

Характерная особенность метеорной связи, составляющая ее основной недостаток, заключается в том, что передача сообщений ведется не непрерывно, а сравнительно короткими «очередями», т. е. только в моменты наличия ионизированных следов в объеме пересечения основных лепестков диаграмм направленности антенн корреспондирующих станций. В среднем можно считать, что цикл передачи не превышает 2—3 *сек* в минуту, т. е. составляет 3—5% от общего времени работы аппаратуры станций.

Для обеспечения передачи быстрыми «очередями» телеграфные (а в некоторых системах также фототелеграфные и телефонные)

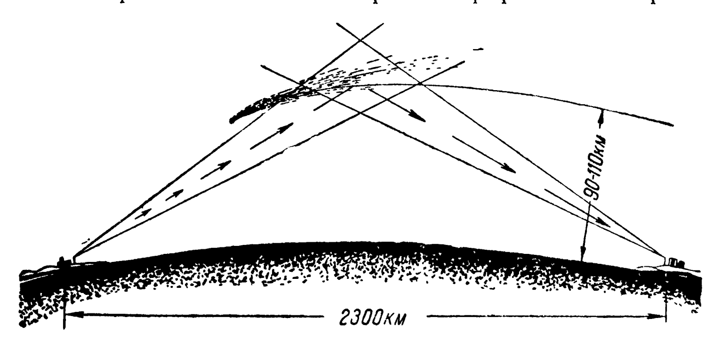


Рис. 16. Схема метеорной связи.

сигналы записываются на магнитную ленту электронного накопителя, который хранит их до появления метеорного следа. При появлении следа в объеме пересечения диаграмм антенн сообщение передается со скоростью, в десятки раз превышающей ту скорость, с какой производилась запись сообщения. На приемном конце сигналы также записываются на магнитную ленту накопителя, с которой они затем равномерно снимаются с нормальной скоростью и воспроизводятся телеграфным аппаратом или другим оконечным устройством.

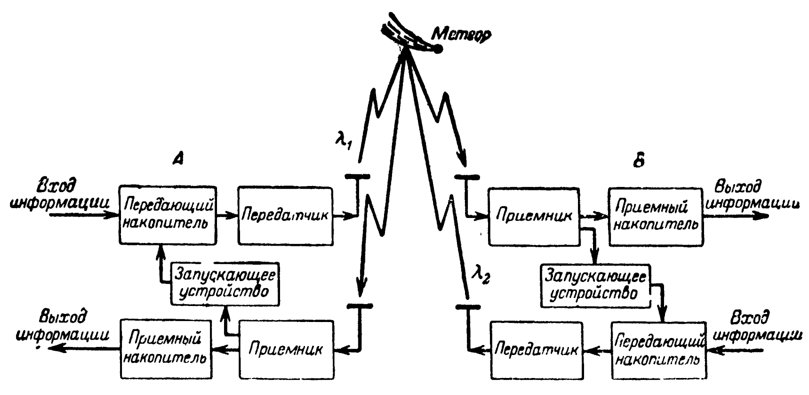


Рис. 17. Структурная схема линии метеорной связи.

На рис 17 показаны основные элементы линии метеорной связи. Радиолиния обслуживается двумя станциями, каждая из которых состоит из передатчика, приемника, передающей и приемной антенн, двух электронных накопителей для записи передаваемых и принимаемых сигналов соответственно и, наконец, запускающего устройства. Один из вариантов такой линии — вариант двусторонней управляемой передачи — работает следующим образом. Оба передатчика и оба приемника включены непрерывно. Передатчики излучают на разных волнах, но их излучения при отсутствии метеорных следов не доходят до корреспондентов. При появлении метеорного следа передатчик *А* через приемник *Б* приводит в действие запускающее устройство правой станции, и передатчик *Б* модулируется информацией, записанной в своем накопителе. В тот же начальный момент передатчик *Б* через приемник *А* включает запускающее устройство левой станции, после чего начинается модуляция передатчика *А* встречным сообщением.

Из всего сказанного очевидно, что метеорная система связи способна обеспечить передачу сообщений с некоторой средней скоростью. Она менее пригодна в роли линии телеуправления, где требуется мгновенное выполнение команды.

Можно ли отнести линию метеорной связи к классу радиорелейных линий? Проблема ретрансляции сигналов через станции метеорной связи в литературе не освещались. Нужно полагать, что в связи с увеличением времени «ожидания» метеоров активная ретрансляция невыгодна. Мы можем лишь рассматривать отражение радиоволн от метеорных следов как частный случай пассивной ретрансляции ультракоротких волн с большими интервалами.

Связь через спутники Земли и искусственные отражающие слои

Открытие принципов ионосферной и метеорной связи значительно расширило возможности осуществления дальних связей на УКВ. Но запросы практики идут дальше. Во-первых, предельное расстояние УКВ связи в 2 000—2 300 *км* недостаточно на многих трансокеанских и трансконтинентальных линиях для замены применяемых на них радиостанций коротких волн. Во-вторых (и это, вероятно, самое главное!), практика не удовлетворяется теми ограниченными значениями полосы пропускаемых частот, которые обеспечиваются передачей с рассеянием в ионосфере, и тем элементом случайности в прохождении сигналов, который присущ метеорной связи. Эра освоения Космоса, установленная запуском советского искусственного спутника Земли 4 октября 1957 г., открыла возможность ретранслировать ультракоротковолновые передачи через искусственные спутники Земли на огромные расстояния и с широкой полосой пропускания (достаточной даже для телевизионной программы).

Идеи использования спутников для дальней радиосвязи заключаются в том, что спутник может служить либо активным, либо пассивным ретранслятором. Каждое из этих двух решений приводит к совершенно различным конструкциям спутников и к несколько отличающимся друг от друга наземным радиостанциям.

Для активной ретрансляции на борту спутника устанавливается комплект аппаратуры примерно такого же состава, как на промежуточной станции радиорелейной линии (два передатчика, работающих

на отличных друг от друга частотах, и два приемника — для ретрансляции в обоих направлениях). Расстояние между наземными станциями, работающими между собой через спутник-активный ретранслятор, зависит от высоты обращения спутника. Так, например, для связи через Атлантический океан по линии Лондон — Нью-Йорк вполне достаточна высота орбиты спутника 4 000—5 000 *км*. Однако трудность задачи состоит в том, что период обращения спутника отличается от периода вращения Земли, а потому спутник будет сравнительно малую часть суток находиться в зоне одновременной видимости его из пунктов размещения наземных станций. Вероятное время прохождения связи на указанной линии составит меньше 4—5 *ч* за сутки. Для того чтобы обеспечить круглосуточную связь на этой линии, потребовалось бы иметь до 20—25 спутников, обращающихся вокруг Земли одновременно (какой-либо из этих спутников с большой вероятностью находился бы в любой момент в зоне одновременной видимости его из пунктов размещения обеих наземных станций).

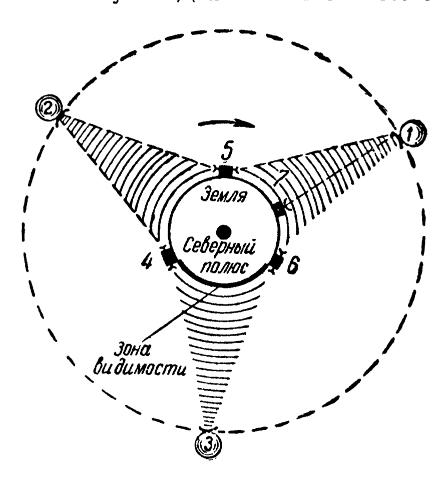


Рис. 18. Система связи через „стационарные" спутники Земли.

Значительно меньшим числом спутников может быть решена задача круглосуточной связи, если запустить их на такую круговую орбиту, период обращения на которой точно равен одним суткам. Высота этой орбиты составляет 35 818 *км*. Спутник будет представляться наземному наблюдателю как бы неподвижно висящим в воздухе и может быть назван «стационарным спутником», если его орбита при этом проходит над земным экватором и его движение направлено на восток.

Геометрические расчеты показывают, что три стационарных спутника-ретранслятора, выведенные на экваториальную орбиту с интервалами по 120° (рис. 18), создадут зону прямой видимости на 98% земной поверхности. Исключением будут небольшие области вблизи полюсов. На рис. 18 цифрами *1*, *2* и *3* помечены станции на спутниках, цифрами *4*, *5*, *6* и *7* — наземные станции, причем все или часть станций образуют при необходимости радиорелейную линию. Расположение наземных станций на границах зон видимости спутников не является обязательным; цифрой *7* помечена станция, установленная в произвольной удобной точке.

Выбор частот, которые можно применить для связи через спутники, ограничен с одной стороны отражением в ионосфере, а с другой — поглощением в молекулах пара. Практически, с учетом размеров бортовых антенн и выбора электронных приборов, считаются приемлемыми волны диапазона примерно от 5 до 30 *см*. Мощность

бортового передатчика стационарного спутника связи должна по предварительным подсчетам составлять около 100 *вт*.

В одном из проектов стационарный спутник, предназначавшийся для многоканальной связи Нью-Йорк—Лондон, имел вид цилиндра, по концам которого располагались параболические антенны, выдвигаемые наружу после выхода на орбиту (рис. 19). Автоматическое выравнивание спутника на орбите предполагалось осуществлять небольшими бортовыми двигателями по сигналам наземных радиостанций. Бортовая аппаратура должна питаться солнечными термоэлементами.

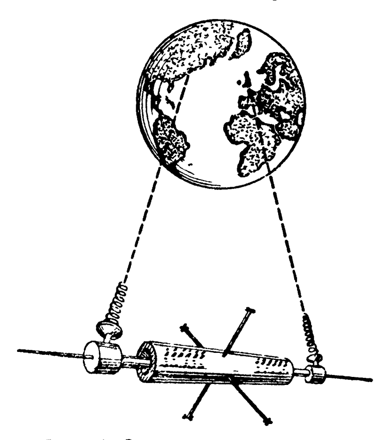


Рис. 19. Один из проектов „стационарного" спутника Земли.

Запуск стационарных спутников связан с рядом трудностей, создаваемых воздействием гравитационных полей Луны и Солнца, а также необходимостью удержать эти спутники на орбите и ориентировать их по отношению к Земле. Запускавшиеся в США до 1961 г. спутники связи не были стационарными. Например, американский спутник «Курьер» 1960 г., имея высоту орбиты около 1 000 *км*, предназначался для активной ретрансляции сигналов с задержкой во времени. Это значит, что на борту спутника записывается на магнитную ленту передача той станции, в зоне видимости которой находится спутник. Далее, когда спутник окажется в зоне видимости второй станции, бортовая аппаратура по сигналу с Земли передает записанную информацию.

Передача сигналов с задержкой во времени (при сравнительно не очень большой высоте орбиты) позволяет иметь на борту маломощные передатчики (лишь единицы ватт). Наземное оборудование радиорелейных станций сходно с оборудованием станций тропосферной связи. Существенное отличие состоит в том, что антенная система с диаметром параболоида 8,4 *м* (рис. 20) должна осуществлять поиск спутника и автоматическое слежение за ним. При приеме сигналов от специального передатчика маяка, находящегося на борту, антенна переводится в режим поиска, «самонаводясь» на несущее колебание основного связного передатчика спутника. С наземной станции посылается кодированная команда для передачи на Землю записанной информации и для записи на борту сообщения с Земли. Мощность основного наземного передатчика связи для спутника «Курьер» составила, например, 1 *квт*, диапазон частот связи 1 700—2 300 *Мгц*. Сигналы маяка передавались на частоте 107,9 *Мгц* (метровые волны)[1].

Наряду с применением искусственных спутников Земли в роли активных ретрансляторов возможна и другая система построения

[1] Aviation Week, 1960, vol. 73, № 9.

радиосвязи через спутники — система пассивной ретрансляции. В этом последнем случае спутник представляет собой надувной баллон с металлизированной поверхностью, способной отражать радиоволны. Первый опытный баллон имел шарообразную форму (спутник «Эхо» 1960 г.). Его оболочка была выведена с помощью раке-

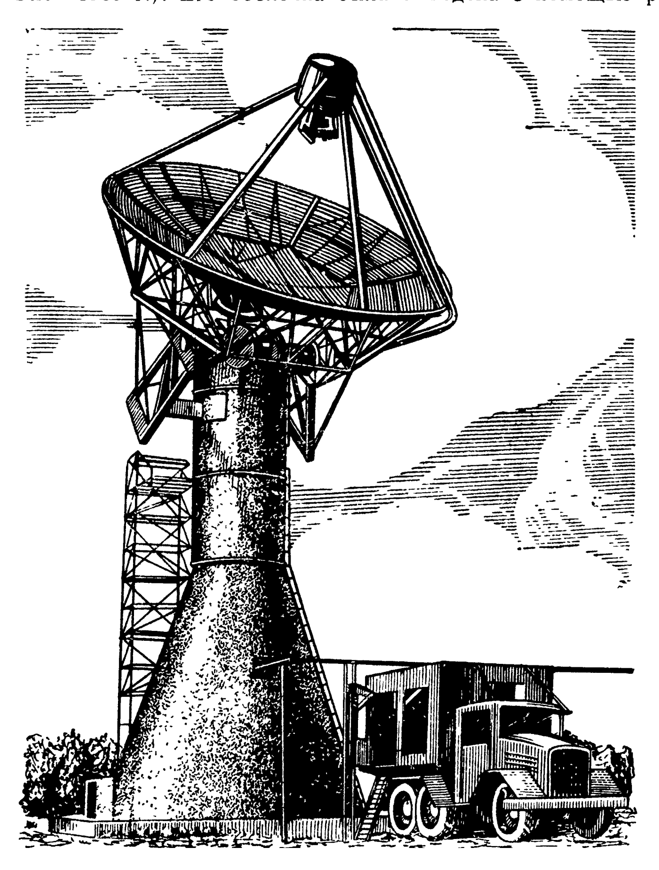


Рис. 20. Наземная станция линии связи через спутник с активной ретрансляцией.

ты на орбиту высотой 1 600 *км*, где раздувалась внутренними остатками воздуха и химическим реактивом (при низком внешнем давлении); шар совершал далее движение по орбите. Диаметр надутого баллона был 30 *м*, его вес около 60 *кг*. Никакого радиоэлектронного оборудования на спутнике не было. Но зато наземные радиостанции осложнялись.

Действительно, из теории распространения радиоволн известно, что при активной ретрансляции принимаемая мощность обратно пропорциональна квадрату расстояния между излучателем

и приемником. При пассивной же ретрансляции (так же, как и в радиолокационной технике) принимаемая мощность обратно пропорциональна четвертой степени расстояния. Значит, с увеличением высоты орбиты пассивного ретранслятора резко возрастет необходимая мощность передатчиков и размеры антенн наземного оборудования. Практические расчеты показывают, что требующееся наземное оборудование вполне осуществимо для пассивных ретрансляторов с высотой орбиты до 5 000 *км*; однако «стационарный» пассивный ретранслятор (с высотой орбиты около 36 000 *км*) требует очень большой мощности наземных передатчиков, а потому пока признается невыгодным.

Опыт использования пластмассового спутника в форме шара был рассмотрен критически и позволил обнаружить ряд недостатков такой системы[1]. Во-первых, форма эластичного баллона изменяется при нагревании Солнцем, изменяя и свою отражательную способность. Во-вторых, при отражении от сферы энергия радиоволн рассеивается во всех направлениях, и только малая ее часть достигает приемного конца линии. Наконец, при столкновении с микрометеоритами вероятно образование отверстий, достаточных для утечки газа из упругого баллона.

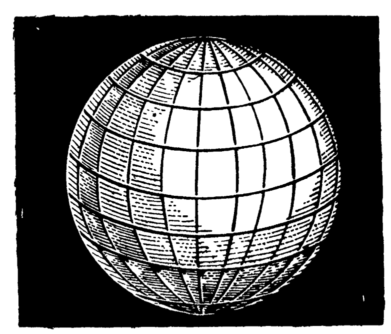


Рис. 21. Пассивный отражатель с шахматной структурой поверхности.

Поэтому в последующих проектах предложены другие конструкции отражателей. В частности, разрабатываются отражатели, которые при выходе на орбиту будут наполняться газом, а затем подвергаться жестчению с помощью химического или какого-либо другого метода.

Что касается формы отражателя, то его поверхность предложено, например, выполнять в виде плоскостей, металлизируемых в шахматном порядке (рис. 21). Против каждого неметаллизированного участка на одной стороне баллона имеется металлизированный участок на другой стороне [2]. Радиоволны, падающие на неметаллизированные участки, проходят сквозь них внутрь баллона и отражаются вогнутыми металлизированными участками с некоторой концентрацией энергии.

Относительно же потребного количества пассивных ретрансляторов на орбитах справедливы те же соображения, какие приводились выше для активных ретрансляторов с передачей без задержки во времени: при трассе протяженностью 3 000—4 000 *км* на орбитах высотой около 5 000 *км* одновременно должны обращаться 20—25 спутников, чтобы было обеспечено прохождение связи в течение 99% времени.

Попутно приходится упомянуть о предложенном в США методе радиосвязи, использующем отражение радиоволн от искусственно

[1] Aviation Week, 1960 Ang 8, vol. 73, № 6.
[2] Aviation, Week, 1960 Ang 22, vol. 73, № 8.

созданного вокруг Земли «пояса», который состоит из огромного числа миниатюрных диполей. Этот проект вызвал справедливые возражения научной общественности многих стран, так как его осуществление угрожает «засорением» околоземного Космоса телами способными нанести вред многим научным исследованиям.

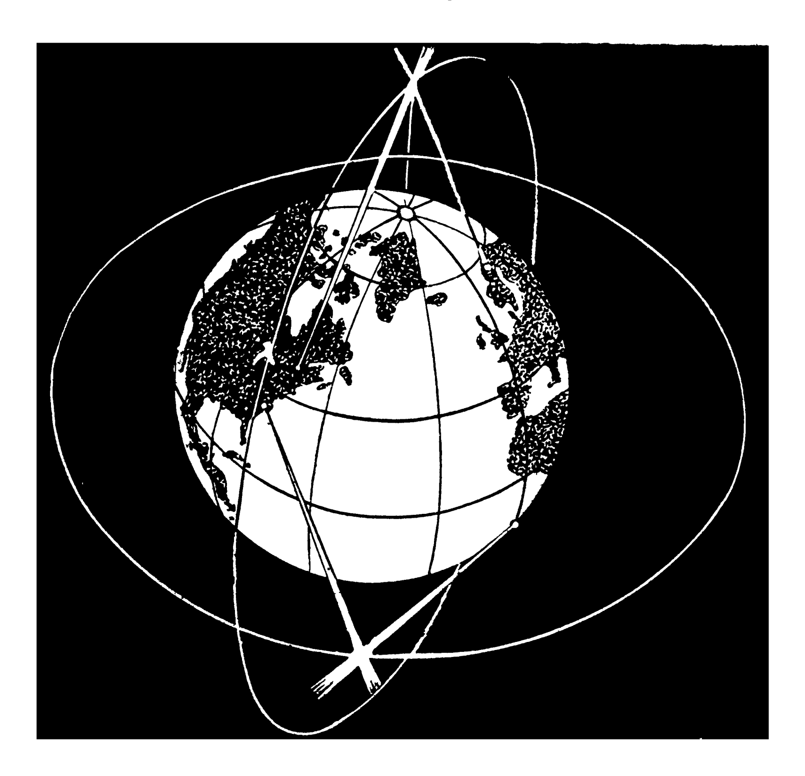


Рис. 22. Схема расположения искусственных отражающих поясов.

Авторы проекта считают, что с помощью двух искусственных поясов, образованных на высоте 3 000—4 000 *км* и расположенных перпендикулярно друг другу в плоскостях экваториальной и полярной орбит (рис. 22), может быть обеспечена радиосвязь между двумя любыми пунктами земного шара. При этом предполагается, что радиоволны будут совершать от одного корреспондента до другого один или два «скачка» между отражающим поясом и Землей (и даже три скачка при связи станций, расположенных одна около Северного, а другая около Южного полюсов). При двух-трех скачках промежуточные наземные станции должны ретранслировать сигналы.

Искусственный отражающий пояс предложено создать из множества «иголок» — медных или оловянных полуволновых диполей длиной около 1,8 *см* и диаметром 0,025 *мм*, настроенных на часто-

ту 8000 *Мгц* (рис. 23). Именно в некотором участке около этой частоты радиоволны будут отражаться.

Для создания пояса на орбите с высотой 3000—4000 *км* требуется 350 миллионов диполей, общий вес которых исчисляется в пределах десятков килограммов. Таким грузом авторы проекта и предлагают засорить околоземное пространство, «рассыпав» диполи с искусственного спутника Земли, выведенного на соответствующую орбиту.

В качестве наземного оборудования в проекте фигурировали передатчики с полезной мощностью около 10 *квт*, антенны диаметром 20 *м* и малошумящие приемники.

Вопрос о продолжительности существования отражающего пояса решается лишь предположительно. Давление солнечного света будет влиять на строение пояса.

В сентябре 1961 г. Академия Наук СССР выразила протест против реализации этого проекта, указав, что иглы в пространстве помешают радиоастрономическим наблюдениям и представят опасность для искусственных спутников Земли с человеком на борту. Следует отметить, что первые попытки запуска контейнера с диполями оказались, по сообщениям американской печати, неудачными.

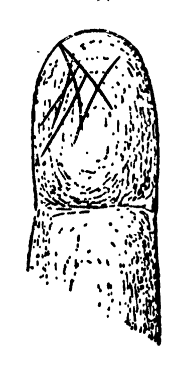


Рис. 23. Металлические диполи на фоне пальца.

Итак, начав рассмотрение вопроса о расстояниях между радиорелейными станциями, мы перечислили много различных принципов, позволяющих увеличивать эти расстояния вплоть до осуществления связи на ультракоротких волнах между любыми точками земного шара.

Остается сказать несколько слов о проблеме связи по линии Земля — Космос. Как указывалось выше, радиопрозрачность атмосферы начинается от частот примерно 20—30 *Мгц* (граница между короткими и ультракороткими волнами) и возрастает с увеличением частоты приблизительно до 10000—20000 *Мгц*; затем она быстро падает и приближается к нулю на частотах около 60000 *Мгц*. Кроме того, в диапазонах частот около 100000 и 500000 *Мгц* в атмосфере ожидаются «радиоокна», где при обычных условиях поглощение невелико. Конкретный выбор наивыгоднейших частот для связи Земля — Космос определяется дополнительными соображениями о возможных конструкциях передатчиков, антенн и другого оборудования. Связь же между космическими кораблями за пределами земной атмосферы, возможно, найдет свое решение при помощи излучателей когерентного света.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

ЧАСТОТНОЕ УПЛОТНЕНИЕ РАДИОРЕЛЕЙНЫХ ЛИНИЙ

Задачи и способы уплотнения

Силы и средства, затрачиваемые на сооружение линии связи, тем быстрее и полнее будут оправданы, чем бо́льший поток сообщений она окажется способной пропускать. Это относится и к радиорелей-

ным линиям. Основным видом передачи по радиорелейным линиям следует признать телефонную передачу. Пропускная способности линии обычно оценивается количеством телефонных каналов, т. е. наибольшим возможным числом одновременно передаваемых телефонных сообщений. Использование линии для нескольких одновременных связей называют уплотнением линии. Аппаратура, обеспечивающая получение нескольких каналов на одной линии, именуется уплотняющей (каналообразующей) аппаратурой.

Для радиорелейных линий применяются две основные системы уплотнения: частотная и временна́я.

Частотная система уплотнения (уплотнение по частоте) состоит в размещении спектров отдельных каналов на разных участках полосы пропускаемых частот линии связи при одновременной и непрерывной передаче сообщений и в разделении этих спектров на приемном конце с помощью электрических фильтров.

Временна́я система уплотнения (уплотнение по времени) осуществляет преобразование непрерывного разговорного тока каждого канала в последовательность электрических импульсов, поочередную посылку импульсов отдельных каналов в линию, распределение этих импульсов по цепям соответствующих абонентов на приемном конце и обратное преобразование импульсов в разговорные токи.

Принципы уплотнения по частоте были первоначально разработаны для дальней телефонной связи по проводам, а принципы уплотнения по времени были реализованы впервые в многократной телеграфной аппаратуре.

Задачу настоящей главы составляет описание методов частотного уплотнения.

Принцип уплотнения по частоте

Сущность частотного уплотнения может быть элементарно показана на простейшей схеме двухканальной передачи по проводной линии телефонной связи (рис. 24). Слева мы видим передающее устройство, а справа — приемное устройство на противоположном конце той же линии. Первичная электрическая форма сигналов в виде токов звуковых частот создается микрофонами двух независимых абонентов ($Аб_1$ и $Аб_2$). Эти первичные сигналы воздействуют каждый на модулятор своего канала (M_1 и M_2). Одновременно модуляторы находятся под непрерывным воздействием колебаний генераторов ($Г_1$ и $Г_2$) надтональных (несущих) частот. Генератор первого канала имеет частоту f_1, а генератор второго канала — более высокую частоту f_2.

На выходах модуляторов имеются колебания соответствующих надтональных частот, промодулированные по амплитуде первичными сигналами. Это означает, что каждое колебание несущей частоты дополняется двумя полосами боковых частот модуляции, как и показано на спектральной диаграмме (рис. 24). Вполне очевидно, что если первичные сигналы располагались в общей полосе звуковых частот, то модулированные колебания оказались разнесенными (разделенными) по оси частот именно благодаря различию несущих частот f_1 и f_2. Для того чтобы физические процессы частотных преобразований представлялись нагляднее, принято спектры разговорных токов изображать треугольниками, в которых ординаты (амплитуды

составляющих колебаний) увеличиваются в сторону более высоких звуковых частот (это — чистая условность!).

Полоса звуковых частот, необходимая для высокой разборчивости телефонной передачи, лежит в пределах 300—3 400 *гц*. Значит, ширина полос между крайними боковыми частотами каналов окажется по 6 800 *гц*. Для того чтобы колебания боковых частот, более удаленных от несущей, не налагались на колебания другого канала и не создавали взаимных помех, на выходах модуляторов включаются полосовые фильтры $Ф_1$ и $Ф_2$, каждый из которых пропускает приблизительно полосу 6 800 *гц* около своей несущей часто-

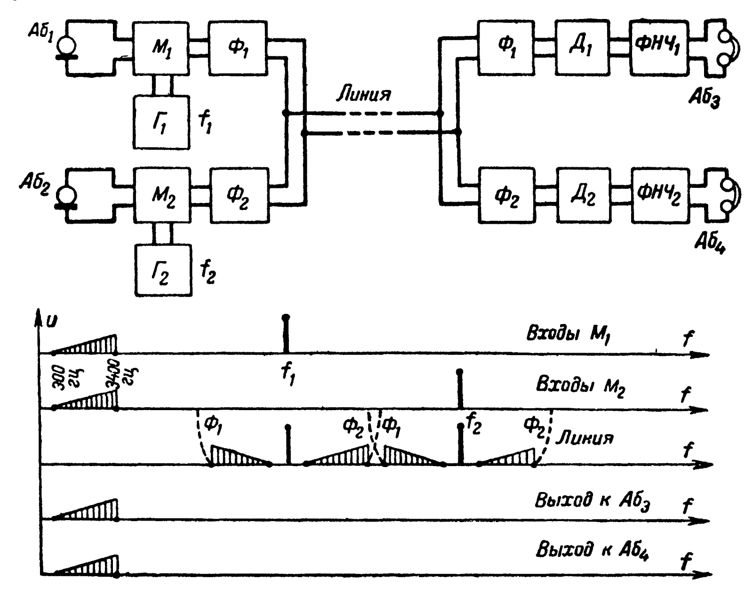


Рис. 24. Простейшая двухканальная линия с частотным уплотнением и спектральные диаграммы процессов в ней.

ты. Выходы фильтров подключены на общую линию. Частотные характеристики затухания фильтров представлены на спектральной диаграмме штриховыми линиями.

На приемном конце линии каналы разделяются с помощью таких же полосовых фильтров. Далее следуют процессы преобразования модулированных колебаний в первичные сигналы звуковых частот. Эту задачу в каждом канале выполняет обычный амплитудный детектор ($Д_1$ и $Д_2$) с последующим фильтром низких частот (ФНЧ), который задерживает токи несущих частот и пропускает токи звуковых частот в абонентские телефоны корреспондентов соответствующих каналов ($Аб_3$ и $Аб_4$).

Следовательно, смысл уплотнения по частоте сводится к модуляции разных несущих частот первичными сигналами разных каналов. Но приведенную на рис. 24 элементарную схему частотного уплотнения приходится существенно усложнять в реальной аппаратуре. Усложнения необходимы не только в связи с увеличением чис-

ла каналов, но и в связи с выполнением некоторых принципиальных требований.

Естественно, что линия должна обеспечивать двусторонний обмен, т. е. на обоих ее концах требуется иметь и передающую и приемную аппаратуру. Иначе говоря, схему на рис. 24 нужно дополнить совершенно такой же схемой, но имеющей микрофоны на правом конце, а телефоны — на левом. Тогда каждый из четырех абонентов будет иметь и микрофон, и телефон. Линия же работы в двух направлениях окажется четырехпроводной. Радиорелейная линия по существу также является «четырехпроводной», так как передача в ту и другую стороны ведется на разных волнах (см., например, рис. 21).

Рис. 25. Дифференциальная система.

Но абоненты соединяются с радиорелейными станциями через коммутатор по двухпроводным линиям. Следовательно, в составе уплотняющей аппаратуры для каждого абонента должно иметься устройство для перехода с двухпроводной линии на четырехпроводную. Такое устройство, именуемое дифференциальной системой, представлено схематически на рис. 25. Задача этой системы — направить разговорный ток, исходящий от микрофона абонента, в тракт передачи канала (к модулятору), а разговорный ток, входящий к абоненту из тракта приема канала (от фильтра низкой частоты), не допустить к модулятору. Для этой цели в состав системы входят дифференциальный трансформатор *Тр*, одна обмотка которого имеет симметричный средний вывод, и балансный контур, полное сопротивление которого $Z_б$ подбирается равным сопротивлению $Z_л$ абонентской линии.

Входящий разговорный ток при указанных выше условиях разветвляется в средней точке трансформатора на два равных тока, направленных противоположно по половинам первичной обмотки. Следовательно, во вторичной обмотке э. д. с. не наводится, т. е. входящий ток не воздействует на модулятор. Таким путем осуществляется развязка цепей передачи и приема канала данного абонента, необходимая для устойчивой работы канала. Заметим, что дифференциальная система будет выполнять свое назначение и в том случае, если зажимы фильтра низких частот и модулятора поменять местами.

Вторым и притом более существенным обстоятельством, усложняющим аппаратуру частотного уплотнения, является требование работы на одной боковой полосе частот амплитудной модуляции. Дело в том, что несущее колебание само по себе не содержит полезного сообщения и вместе с тем, имея бóльшую амплитуду, чем колебания боковых частот, загружает линию. В то же время колебания обеих боковых полос несут одно и то же сообщение, а потому достаточно посылать в линию одну из этих полос — либо верхнюю, либо нижнюю. Благодаря этому полоса частот, занимаемая в линии каждым каналом, уменьшается приблизительно вдвое, т. е. число каналов в общей полосе, пропускаемой линией, может быть удвоено.

Следовательно, в каждом канале уплотняющей аппаратуры необходимо выполнить две дополнительные задачи: в передающей части «подавить» (на пропустить в линию) колебания несущей частоты и одной из боковых полос, а в приемной части обеспечить условия успешного детектирования однополосного сигнала.

Подавление несущего колебания достигается применением специальных балансных схем модуляторов, одна из которых дана на рис. 26. Собственно модулятор составлен из четырех полупроводниковых диодов, имеющих тождественные характеристики и включенных по схеме уравновешенного «мостика». К вертикальной диагонали мостика подводится через согласующий трансформатор *Тр* модулирующее напряжение звуковой частоты *F* от абонентского микрофона, а к горизонтальной диагонали — напряжение несущей частоты *f* от генератора

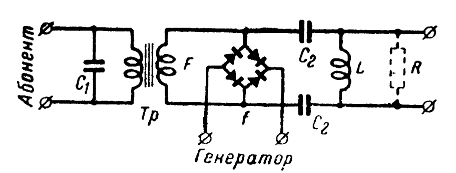


Рис. 26. Модулятор, подавляющий несущее колебание.

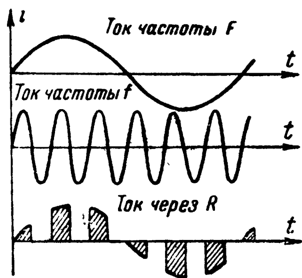


Рис. 27. Физические процессы в балансном модуляторе.

данного канала. Полезным потребителем является входное сопротивление *R* следующего блока схемы.

Работа модулятора происходит следующим образом. Из схемы видно, что по отношению к трансформатору низкой частоты диодный мостик включен параллельно сопротивлению *R*, т. е. он шунтирует полезную нагрузку. Степень шунтирования зависит от знака напряжения, прилагаемого к диодам со стороны зажимов генератора несущей частоты. Положительные полупериоды (слева — плюс, справа — минус) «открывают» диоды, и они замыкают вторичную обмотку трансформатора практически «накоротко», т. е. ток через сопротивление *R* не идет. Отрицательные полупериоды несущего колебания «запирают» диоды, и ток через нагрузку идет. Следует подчеркнуть, что шунтирующее действие диодного мостика равноценно и для положительного, и для отрицательного полупериодов тока звуковой частоты, хотя в этих случаях действуют разные пары противолежащих плеч мостика.

Ток в нагрузочном сопротивлении *R*, получаемый в результате совместного действия двух напряжений, изображен на рис. 27. В составе этого тока колебание несущей частоты отсутствует; это вполне естественно, ибо относительно генератора выходные зажимы мостика уравновешены (сбалансированы). Так «подавляется» на выходе колебание несущей частоты.

В составе прерывистого тока имеются колебания обеих боковых полос ($f+F$ и $f-F$) и колебание частоты *F*; для последнего выход загражден фильтром верхних частот, составленным из конденсаторов C_2 и катушки *L*. В свою очередь токи высоких частот не проходят в цепь абонента благодаря заграждающему действию фильтра

нижних частот, образованного индуктивностью рассеяния трансформатора и емкостью C_1.

Вслед за выходом балансного модулятора в тракт передачи включается полосовой фильтр, пропускающий только одну из полос модуляции. На рис. 28 показано выделение нижней боковой полосы и подавление верхней. Полосовой фильтр имеет полосу прозрачности от f — 3 400 до f — 300 *гц*, т. е. всего 3 100 *гц*. Несущая частота соседнего канала отличается на 4 000 *гц*, так что на каждый канал (с учетом «защитных» промежутков между каналами) по установленным нормам отводится 4 *кгц*.

На принимающем конце линии полоса частот данного канала выделяется из всей группы спектров таким же полосовым фильтром. Затем спектр боковых колебаний нужно преобразовать в спектр зву-

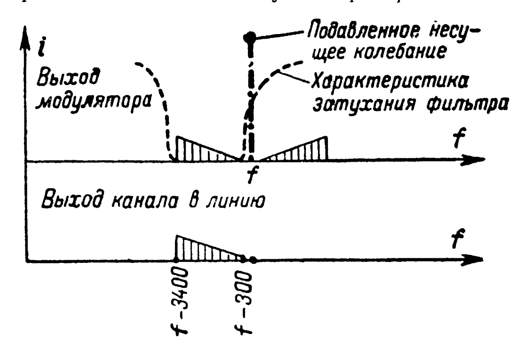


Рис. 28. Выделение нижней боковой полосы.

ковых частот. При однополосном приеме такая задача не может быть выполнена обычным детектированием. Одновременно с однополосным сигналом к детектору необходимо подвести колебание местного генератора (гетеродина), частота которого была бы практически равна частоте несущего колебания, подавляемого в модуляторе. Иначе говоря, детектирование должно осуществляться при наличии «восстановленного» напряжения несущей частоты.

В качестве преобразователя однополосного сигнала в звуковой может служить схема балансного детектора, вполне сходная со схемой балансного модулятора (см. рис. 26), но имеющая обратный порядок включения. На вход ее из линии воздействуют колебания боковой полосы, к горизонтальной диагонали мостика подведено непрерывное напряжение генератора несущего колебания частоты f, а на выход через фильтр нижних частот выводится разговорный ток, полученный в результате преобразования (демодуляции).

Восстанавливать несущую частоту требуется с высокой точностью (погрешность в десяток герц приводит к искажению воспроизводимого сигнала). Поэтому колебания генераторов обычно стабилизируются кварцами. Кварцевые генераторы — дорогая часть аппаратуры; число их желательно иметь минимальным. Естественно, что для модулятора и демодулятора индивидуального канала на данном конце линии используется колебание одного генератора. Более того,

вся группа каналов обеспечивается обычно одним общим генератором гармоник, кратных основной частоте 4 *кгц*.

С учетом всего сказанного будет понятным назначение основных блоков аппаратуры частотного уплотнения, развернутых для двух

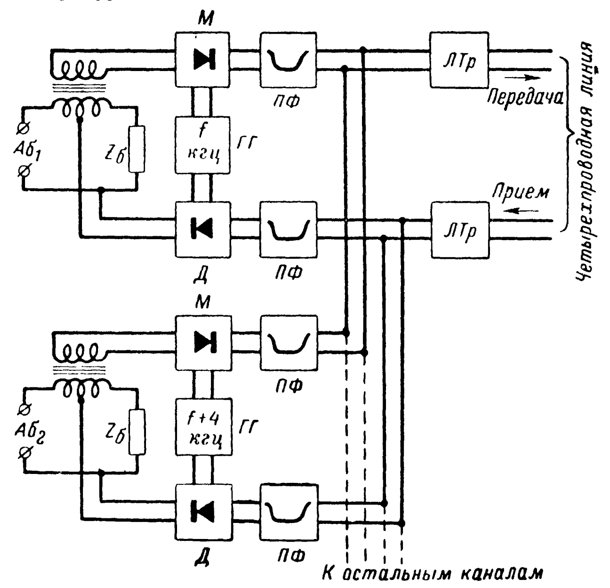


Рис. 29. Структурная схема двух каналов уплотнения.

каналов на рис. 29. Здесь *ГГ* — генератор гармоник, общий для всей аппаратуры и позволяющий брать для каналов отдельные гармоники через 4 *кгц; ПФ* — полосовые фильтры, характеристики которых одинаковы по полосе пропускания (3 100 *гц*), но смещены на 4 *кгц* вверх в последующем канале по сравнению с предыдущим;

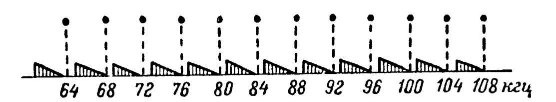


Рис. 30. Спектр колебаний типовой 12-канальной аппаратуры частотного уплотнения.

ЛТр — линейные трансформаторы соответственно передачи и приема, согласующие линии с параллельным соединением полосовых фильтров каналов: *М* — модуляторы; *Д* — демодуляторы.

На рис. 30 изображен частотный спектр токов на выходе типовой аппаратуры частотного уплотнения на 12 каналов; цифры указывают подавляемые несущие частоты каналов. В данном случае использованы нижние полосы боковых частот модуляции, разделяемые с помощью кварцевых полосовых фильтров. Именно этим и

определяется выбор сравнительно высоких несущих частот для индивидуальных преобразователей каналов: изготовление кварцев на более низкие частоты — трудная задача.

Типовая 12-канальная аппаратура может использоваться для уплотнения кабельных и радиорелейных линий. Если показанное на рис. 30 размещение спектра на оси частот по каким-либо соображениям невыгодно для передачи по линии, то осуществляется перенос всего спектра каналов в другой участок оси частот при помощи общего, группового преобразователя. Последний содержит свой модулятор и свой демодулятор, а также свои фильтры, пропускающие широкие полосы частот. Так, например, если к групповому преобразователю подвести от генератора гармоник колебание с частотой 120 *кгц*, то образуются боковые полосы 12—60 и 180—228 *кгц*. Подавляя с помощью группового фильтра верхнюю полосу, получим перенос спектра всех каналов в область 12—60 *кгц*, более выгодную для передачи по кабелю.

Если уплотнение 12 каналами недостаточно, то с помощью групповых преобразователей, питаемых разными частотами, можно разнести спектры пяти 12-канальных групп по оси частот и образовать 60-канальную «сверхгруппу». Точно также при необходимости можно преобразовывать и сверхгруппы, доводя общее число каналов в линии до 600 или до 960 и более.

Широкая возможность наращивать число каналов составляет большое достоинство системы частотного уплотнения. Советские стационарные радиорелейные линии Р-60 (на 60 каналов) и Р-600 (на 600 каналов), разработанные коллективом специалистов под руководством С. В. Бородича, уплотнены по частоте именно указанными выше способами.

Однако с увеличением числа каналов возрастают габариты и стоимость аппаратуры уплотнения. Достаточно напомнить, что каждый канал требует наличия двух полосовых фильтров, дифференциальной системы и других деталей. Особенно дороги кварцевые фильтры.

При небольшой протяженности линии (например, с одним интервалом) аппаратура уплотнения оказывается дороже всех остальных сооружений. В таких случаях особенно необходимо упрощение и удешевление уплотняющей аппаратуры. В последнее время в зарубежной печати появились упоминания о том, что для связи между местными автоматическими телефонными станциями применяется уплотнение по времени (импульсно-кодовая система), о чем речь будет ниже.

Однако и аппаратура частотного уплотнения имеет пути упрощения и удешевления. Значительную роль в этом направлении может сыграть микроминиатюризация элементов аппаратуры, а также отказ от кварцевых полосовых фильтров. Последнее возможно, если подавление ненужной боковой полосы осуществлять не с помощью фильтра, а с помощью так называемой фазоразностной модуляции в преобразователях каналов. Идея этого метода состоит в применении в одном индивидуальном преобразователе канала двух модуляторов, на выходах которых колебания ненужной боковой полосы оказываются противофазными и взаимно подавляются. Уплотняющая аппаратура, упрощенная таким образом, уже находит применение на наших линиях связи.

Особенности частотного уплотнения радиолиний

Принцип соединения уплотняющей аппаратуры с передатчиком и приемником оконечных станций радиорелейной линии был показан на рис. 2. Токи многоканального спектра с выхода передающей части аппаратуры уплотнения подаются на вход модулятора передатчика; они модулируют колебания сверхвысокой частоты, генерируемые передатчиком. Сверхвысокая частота передатчика может быть названа «несущей» для всего многоканального спектра модуляции. В связи с этим подавленные частоты отдельных каналов иногда называют в радиорелейных системах уже не несущими, а «поднесущими» частотами. Многоканальный спектр, получаемый на выходе приемника в результате детектирования принятых колебаний, вводится в приемную часть аппаратуры уплотнения, и отсюда после разделения каналов и демодуляции разговорные токи поступают к соответствующим абонентам.

Принципиальным вопросом для радиорелейной аппаратуры является выбор вида модуляции передатчика, так как этим в значительной степени определяется помехозащищенность радиолинии. Для систем с непрерывным излучением, какими являются радиорелейные станции при уплотнении по частоте, повышенная помехозащита обеспечивается частотной модуляцией. Поэтому именно частотная модуляция и применяется в передатчиках радиорелейных линий, уплотняемых по частоте. Соответственно в приемниках имеет место частотное детектирование с предварительным ограничением, подавляющим паразитную шумовую модуляцию.

Из сказанного выше очевидно, что в многоканальных радиолиниях имеет место «двухступенная» модуляция. Первой ступенью является однополосная модуляция (ОМ) в каналах аппаратуры уплотнения. Второй же ступенью оказывается частотная модуляция (ЧМ) в передатчике сверхвысокой частоты. Соответственно и демодуляция сигналов осуществляется двумя ступенями: частотное детектирование в приемнике и однополосная демодуляция в каналах аппаратуры уплотнения. Иначе говоря, однополосная модуляция является первичной, а частотная — вторичной. Такое сочетание ОМ—ЧМ характерно для радиорелейной связи с уплотнением по частоте.

Следует отметить, что в последнее время для радиорелейных линий, особенно для линий тропосферной связи, предлагается и на несущей сверхвысокой частоте осуществлять однополосную модуляцию. Одним из существенных достоинств такой системы (ОМ—ОМ) считается более узкая полоса, занимаемая сигналом на сверхвысокой частоте, по сравнению с полосой при частотной модуляции. Но при реализации новой системы приходится преодолевать некоторые трудности, связанные, например, с требованием высокой стабильности частоты аппаратуры дециметровых или сантиметровых волн. Очевидно, что задача точного восстановления несущей частоты на этих волнах решается гораздо сложнее, нежели в аппаратуре уплотнения.

Заслуживают внимания некоторые особенности оконечных и промежуточных станций радиорелейной связи с частотным уплотнением.

Радиорелейная линия может служить продолжением кабельной линии связи. В этом случае уплотняющая аппаратура в составе оконечной радиорелейной станции не нужна и находится в начале кабельной линии. По кабелю подводится к передатчику радиолинии

многоканальный спектр. От приемника радиолинии многоканальный спектр поступает в другую пару кабеля. Кабельные пары согласуются с входами станционного оборудования при помощи линейных трансформаторов *Тр,* как показано на рис. 31. Однако мощность группового сигнала, подводимого со стороны кабеля, может оказаться недостаточной для эффективной модуляции, а мощность сигнала на выходе приемника может быть недостаточной после передачи по кабелю для эффективной демодуляции сигналов в аппаратуре уплотнения. Поэтому оконечная станция дополняется групповыми усилителями *ГУ* передачи и приема. Требования к груповому усилителю высоки: он должен обеспечивать одинаковое усиление в полосе частот всех каналов и минимальные нелинейные искажения, наличие которых приводит к переходным помехам между каналами.

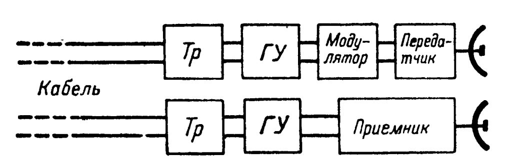


Рис. 31. Оконечная станция с выходом на кабельную линию.

Следует заметить, что радиорелейные станции с малым числом каналов обычно имеют аппаратуру уплотнения в качестве своей составной части, чем и типизируется серийная станция в целом. Это в первую очередь относится к подвижным радиорелейным станциям на малое число каналов.

На промежуточных станциях стационарных многоканальных линий уплотняющая аппаратура необходима в тех случаях, когда предусматривается выделение части каналов для ввода их в местную телефонную сеть. Станции, допускающие выделение каналов, располагаются обычно вблизи населенных пунктов и называются иногда узловыми станциями. Что же касается промежуточных станций, на которых не предусмотрено ответвление каналов и которые иногда называются станциями сквозной ретрансляции, то они вовсе не требуют уплотняющей аппаратуры. Исключение составляет только канал служебной связи, обеспечивающий телефонные переговоры между станциями и требующий, следовательно, устройств выделения. Однако в ряде случаев для служебной связи используется специальная линия, параллельная основной.

Варианты построения промежуточных станций будут освещены ниже, в специальной главе.

В магистральных радиорелейных линиях, рассчитываемых на большую пропускную способность, используется дополнительная возможность уплотнения на сверхвысоких частотах путем создания нескольких «стволов». Структура радиорелейной линии, имеющей три ствола, изображена на рис. 32 в составе двух оконечных и одной промежуточной станций.

Каждый ствол представляет собой последовательность радиорелейных устройств, образующих самостоятельную линию со своим собственным уплотнением. На каждой станции имеется столько ком-

плектов устройств, сколько стволов должна иметь линия (на рис. 32 по три комплекта). Объединены же комплекты работой на общие антенны, но на разных волнах. Следовательно, система стволов может быть названа системой уплотнения с разделением по сверхвысоким частотам. Это разделение выполняется фильтрами *Ф*, через которые несколько передатчиков *Пер* или несколько приемников *Пр*

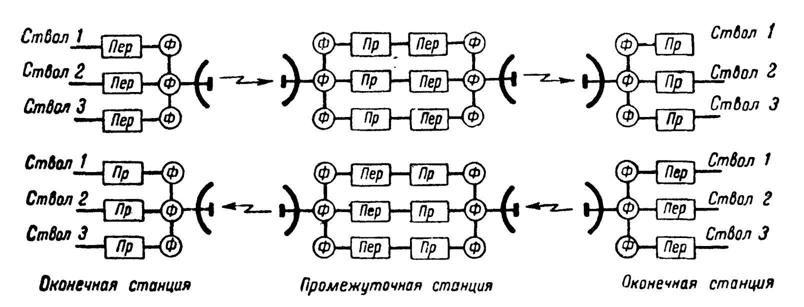


Рис. 32. Структура радиорелейной линии с тремя стволами.

включаются на общую антенну. Ввиду того, что антенные устройства и их опоры составляют сложную часть оборудования, такое многократное их использование выгодно.

Магистральные линии строятся с числом стволов до шести. Один из них является обычно резервным, один отводится под канал телевидения, остальные уплотняются телефонными каналами. Если каждый ствол телефонной передачи пропускает 600 каналов, то общее их число для такой линии окажется 2 400. Таковы уже осуществленные возможности радиорелейной связи.

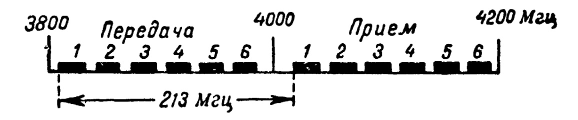


Рис. 33. Рекомендованное распределение частот для шести стволов магистральной линии.

Для того чтобы излучение передатчиков не создавало помех приемникам своей станции, частóты передатчиков и приемников должны быть по возможности дальше разнесены в диапазоне всей многоствольной станции. На рис. 33 показано примерное распределение участков частот радиорелейной станции сантиметрового диапазона, имеющей шесть стволов. Вся станция занимает диапазон шириной 400 *Мгц*, а между частотами передачи и приема одного ствола разнос составляет 213 *Мгц*. Если такой разнос недостаточен для исключения помех, то в каждом направлении приходится применять четыре антенны вместо двух: по одной паре антенн проходят сигналы нечетных стволов, по другой — четных.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

УПЛОТНЕНИЕ РАДИОРЕЛЕЙНЫХ ЛИНИЙ ПО ВРЕМЕНИ

Принцип временно́го уплотнения

Сущность уплотнения по времени можно пояснить с помощью условной схемы на рис. 34, изображающей одностороннюю передачу по проводам четырех телефонных каналов с их разделением по времени. В этой схеме микрофоны передающей стороны и соответственные телефоны принимающей стороны попарно соединяются друг с другом в порядке нумерации, каналов при помощи распределителей (коммутаторов), вращающихся с одинаковой скоростью и в одинаковой фазе.

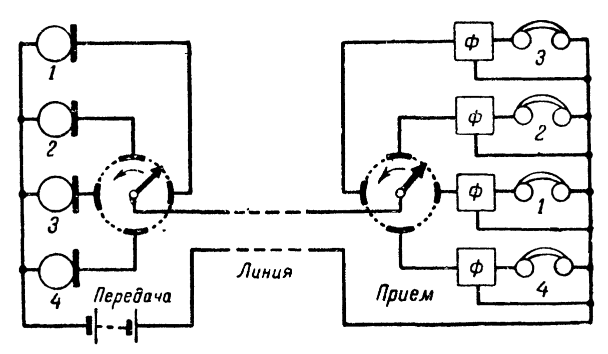


Рис. 34. Принцип уплотнения по времени.

ковой фазе. Когда, например, распределитель передающей стороны проходит по контакту первого канала, то и распределитель приемной стороны проходит по своему контакту первого канала, и т. д. Следовательно, ток в цепи каждого канала имеет форму прерывистых посылок (и м п у л ь с о в), причем длительность импульса τ равна времени прохождения распределителя по контакту. Синхронная работа распределителей позволяет импульсам 1-го канала попадать в телефон 1-го канала и т. д., т. е. здесь действительно имеет место разделение каналов во времени (временно́е уплотнение линии).

Скорость вращения распределителей должна быть такой, чтобы за самый короткий период звукового колебания прошло в цепи данного канала не менее двух импульсов. Еще в 1932 г. акад. В. А. Котельников показал, что два импульса на каждый период составляют тот минимум, который позволит воспроизвести на приемной стороне синусоидальный ток, передаваемый путем посылки в линию равномерно повторяющихся импульсов. Эта теорема иллюстрируется графически на рис. 35. Верхний график изображает тот ток, который проходил бы в цепи микрофона канала при отсутствии прерываний. Вторым графиком представлены импульсы, пропускаемые в линию распределителем передачи На нижнем же графике мы

видим ток в телефоне того же канала после прохождения через фильтр нижних частот Φ (рис. 34); этот фильтр пропускает частоту F синусоиды и более низкие частоты, но задерживает частоту $2F$ повторения импульсов. Сигнал в телефоне воспроизводится в виде усредненного тока импульсов, но с уменьшенной мощностью (по сравнению с верхним графиком).

Наивысшая частота, необходимая для хорошего воспроизведения телефонной передачи, составляет, как нам уже известно, 3 400 *гц*. Исходя из этого, частоту вращения распределителей берут 8 000 *об/сек*. Соответственно частота повторения импульсов в канале (называемая тактовой частотой) $f_i = 8\,000$, а период повторения $T_i = 125$ *мксек*.

Импульсы четырех каналов, показанных на рис. 34, посылаются в линию поочередно; в промежутках времени между посылками импульсов первого канала следуют импульсы второго, третьего и четвертого каналов, и далее нумерация повторяется. Физические процессы в такой системе развернуты по времени на рис. 36. Импульсы тока каждого канала своей высотой (или, как принято говорить условно, своей амплитудой) воспроизводят форму соответствующего разговорного тока. Иначе говоря, амплитуда импульсов изменяется по закону разговорного тока канала. Это есть один из видов модуляции импульсов, где модулируемым параметром является их амплитуда. Будем называть этот вид модуляции **импульсно-амплитудной модуляцией** (ИАМ). Учитывая импульсный характер токов, связь с уплотнением по времени называют нередко **импульсной связью**.

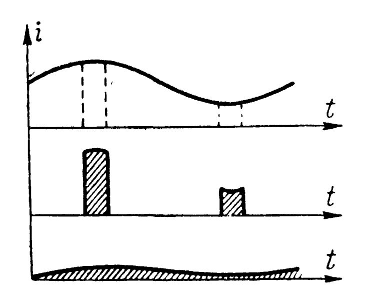


Рис. 35. Передача непрерывного сигнала импульсами.

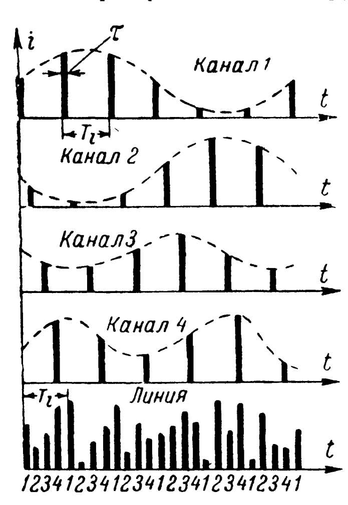


Рис. 36. Временно́е уплотнение линии четырьмя каналами.

Теперь решим вопрос о длительности τ каждого импульса. На рис. 34 контакты каналов не перекрываются распределителем, а потому проникновение импульса тока данного канала в цепь последующего канала, казалось бы, невозможно. Однако наличие в линии собственных индуктивности и емкости может удлинить задние фронты импульсов за счет переходных процессов. Это приведет к переходным помехам между каналами. Следовательно, необходимо

обеспечить между импульсами достаточные «защитные» промежутки времени (вспомним, что при уплотнении по частоте вводились защитные частотные участки для расфильтровки, см., например, рис. 30). Весь тактовый период T_i длится 125 *мксек*. Значит, чем больше число каналов и чем надежнее хотим мы иметь защитные промежутки времени, тем короче должен быть импульс. Практически в системах импульсной связи длительность импульсов исчисляется микросекундами и даже долями микросекунды.

Вполне понятно, что механические распределители, показанные на условной схеме рис. 34, для реальной аппаратуры непригодны. В практике импульсной связи применяются электронные коммутирующие устройства. Электронными средствами решается также задача обеспечения синхронной и синфазной работы распределителей передающей и принимающей сторон линии. Естественно, что по мере укорочения импульса требования к точности синхронизации возрастают. Увеличение числа каналов радиолинии с временны́м уплотнением достигается укорочением импульса и повышением точности синхронизации. Трудности, связанные с этим, становятся очень значительными, если число каналов приближается к сотне. Поэтому заранее следует отметить, что если количество каналов в одном стволе радиорелейной линии с уплотнением по частоте может исчисляться сотнями, то при уплотнении по времени количество каналов обычно исчисляется десятками. Однако система временно́го уплотнения имеет свои достоинства, о которых речь будет позднее.

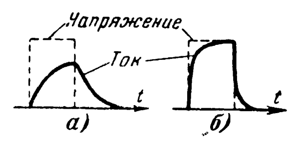


Рис. 37. Прохождение видеоимпульсов в цепях с узкой и широкой полосой пропускания.

Сейчас необходимо рассмотреть несколько принципиальных вопросов, относящихся к импульсной связи.

Импульсы тока или напряжения одного знака, подобные изображенным на рис. 35 и 36 (односторонние импульсы), принято кратко называть в и д е о и м п у л ь с а м и — по аналогии с формой первичных телевизионных сигналов. Наличие в тракте передачи неизбежных реактивных элементов — емкости и индуктивности — способно исказить форму импульсов, как об этом говорилось выше.

Свойства тракта передачи в смысле влияния на форму импульсов характеризуются полосой пропускания. Какая же ширина полосы пропускания потребуется для прохождения видеоимпульсов? Чем шире полоса пропускания, тем быстрее нарастает ток в приемных цепях под действием импульса напряжения и тем быстрее исчезает ток по окончании посылки. На рис. 37,*а* показано воспроизведение импульса в тракте с узкой полосой пропускания, а на рис. 37,*б* — с широкой полосой. В первом случае длительность переходных процессов (нарастания и спадания тока) оказывается больше, чем длительность самого импульса напряжения, и форма сигнала сильно искажается. Во втором случае искажения менее значительны. Следовательно, чем короче импульсы, тем меньшая может быть допущена длительность переходных процессов, т. е. требуется более широкая полоса пропускания.

Однако если полосу пропускания расширять чрезмерно, то точность воспроизведения импульса заметно не улучшится, так как импульс и без того уже воспроизводится практически без искаже-

ний (см., например, рис. 37,*б*); в то же время с расширением полосы пропорционально возрастает мощность шумовых помех, ухудшающих качество воспроизводимого сигнала. Значит, для каждой длительности импульса τ существует некоторое наивыгоднейшее значение полосы пропускаемых видеочастот. Это наивыгоднейшее значение полосы связано с длительностью импульса законом обратной пропорциональности:

$$\Delta F \approx \frac{0{,}7}{\tau}.$$

Отсюда легко подсчитать, что для импульса длительностью, например, *1 мксек* полоса пропускания видеотракта должна быть 700 *кгц* (практически около 1 *Мгц*).

К тому же выводу можно прийти путем спектрального представления импульсных сигналов. Периодически повторяющиеся немоду-

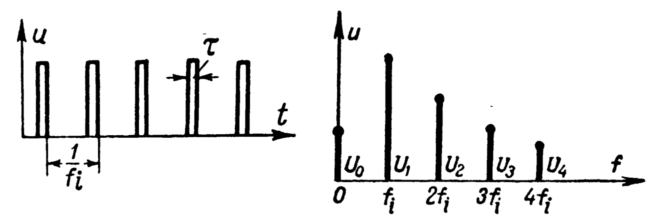


Рис. 38. Последовательность видеоимпульсов без модуляции.

Рис. 39. Пример спектра последовательности видеоимпульсов.

лированные видеоимпульсы (рис. 38) могут быть представлены суммой синусоидальных колебаний, частóты которых кратны частоте повторения импульсов (f_i, $2f_i$, $3f_i$ и т. д). Эти синусоидальные колебания называются гармониками с соответствующими номерами (первая, вторая и т. д.). Амплитуды высших гармоник напряжения U_2, U_3, U_4 и т. д. (или гармоник тока, если речь идет о спектральном представлении импульсов тока), меньше, чем амплитуда основной (первой) гармоники U_1, как видно из рис. 39. Кроме синусоидальных составляющих, последовательность видеоимпульсов содержит постоянную составляющую U_0 (среднее значение напряжения или тока).

Анализ показывает, что амплитуды высших гармоник убывают по оси частот (в сравнении с амплитудой основной гармоники) тем «медленнее», чем меньше длительность импульса τ. Но для неискаженного воспроизведения импульсов видеотракт должен пропускать все высшие гармоники, вплоть до таких, у которых амплитуды составляют достаточно малую долю от амплитуды основной гармоники. Значит, спектральное представление импульсов подтверждает наш вывод об обратной пропорциональности между необходимой полосой пропускания ΔF и длительностью импульса τ. Короче говоря, для видеоимпульсов, обеспечивающих телефонное уплотнение по времени, линия связи должна быть широкополосной. В проводной связи такую широкую полосу обеспечивают только коаксиальные кабели, а потому не случайно то обстоятельство, что по воз-

душным линиям и симметричным кабелям импульсный метод телефонной связи не применяется.

Важной особенностью импульсных методов связи является то, что процесс модуляции видеоимпульсов не вызывает необходимости увеличивать полосу пропускания линии связи (мы видели, что в системах с частотным уплотнением потребная полоса определялась именно спектрами частот модуляции). Дело в том, что если последовательность видеоимпульсов подвергается модуляции по амплитуде (как было показано для каналов на рис. 36) с модулирующей частотой F, то около каждой из гармоник тактовой частоты f_i создаются пары боковых частот модуляции (f_i-F, f_i+F и т. д.), как изображено на рис. 40. Иначе говоря, амплитудной модуляции подвергается каждая гармоника в спектре последовательности импульсов. Из рис. 40 очевидно, что общая ширина полосы частот, занимаемых спектром, при модуляции практически не изменяется.

Кроме боковых частот, за счет модуляции в спектре появилась составляющая звуковой частоты F; это есть результат изменений среднего значения напряжения или тока, что и было представлено на рис. 35. На принимающей стороне именно эта составляющая выделяется фильтром, характеристика которого показана пунктиром на рис. 40. Процесс получения первичного сигнала, воспроизводимого телефоном, называют демодуляцией импульсов.

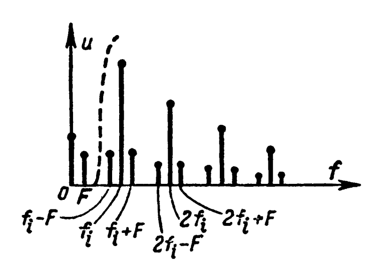


Рис. 40. Пример спектра видеоимпульсов, модулируемых по амплитуде.

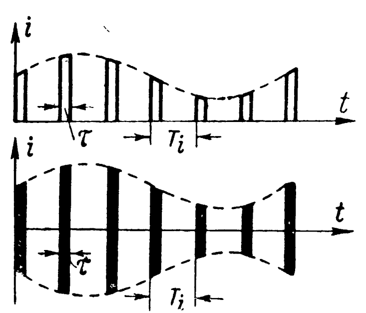


Рис. 41. Первичная импульсно-амплитудная модуляция и вторичная (радиочастотная) модуляция по амплитуде (ИАМ—АМ).

Теперь обратимся к импульсной радиосвязи. Для излучения сигналов необходимо видеоимпульсы преобразовать в колебания сверхвысокой частоты. Это преобразование является вторичным этапом модуляции — радиочастотной модуляцией. Видеоимпульсы, воздействуя через модулятор, управляют колебаниями радиопередатчика. Простейшим видом управления оказывается модуляция радиопередатчика по амплитуде, изображенная на рис. 41: при воздействии видеоимпульсов передатчик отпирается, и колебания радиочастоты поступают в антенну, воспроизводя своими амплитудами форму видеоимпульсов.

Тактовый период T_i и длительность импульса τ характеризуют как видеоимпульсы, так и радиоимпульсы. Антенна передатчика излучает в пространство электромагнитные волны в виде таких же радиоимпульсов. Как указывалось выше, длительность видеоимпуль-

сов мала; однако она значительно больше периода колебаний сверхвысокой частоты. Пусть, например, несущая радиочастота $f_0 = 10^9$ *гц* (длина волны 30 *см*), а длительность видеоимпульса $\tau = 1$ *мксек*; тогда один радиоимпульс содержит 1 000 периодов несущего колебания.

Какую ширину полосы пропускания должен иметь радиоприемник, чтобы воспроизвести излучаемые передатчиком радиоимпульсы?

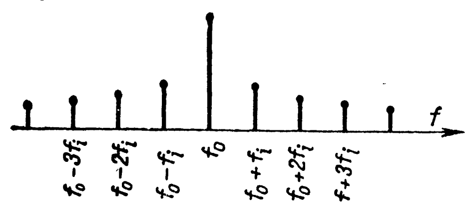


Рис. 42. Спектр частот при модуляции радиопередатчика импульсами.

Известно, что в процессе модуляции передатчика по амплитуде каждое колебание модулирующей частоты создает пару боковых колебаний около радиочастоты f_0. Значит, гармоники спектра видеоимпульсов (рис. 39) образуют верхнюю и нижнюю полосы частот, симметричные около несущей частоты f_0 радиопередатчика (рис. 42). Отсюда видно, что ширина полосы радиочастот удваивается по сравнению с шириной видеоспектра. Полоса пропускания приемника $2\Delta F \approx 1{,}4/\tau$, т. е для импульсов длительностью в 1 *мксек* она окажется 1,4 *Мгц*, или, округленно, около 1,5 *Мгц*. Обычно полосу частот берут несколько большей, учитывая нестабильности настроек передатчика и приемника. Таким образом, **приемники** в импульсной радиосвязи должны быть **широкополосными**.

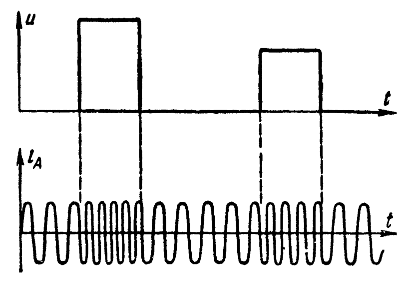


Рис. 43. Управляющее напряжение и радиочастотный ток в системе ИАМ—ЧМ.

Процессы преобразования сигналов в приемнике обратны процессам на передающей стороне. Радиоимпульсы подвергаются обычному амплитудному детектированию, т. е. преобразуются детектором в видеоимпульсы. Затем с помощью фильтра нижних частот видеоимпульсы демодулируются; выделяется ток разговорной частоты, питающий телефон.

Следует отметить, что описанные выше виды первичной и вторичной модуляции (ИАМ-АМ) не обеспечивают помехозащищенности приема. Если в качестве первичной модуляции сохранить амплитудную, то в качестве вторичной, обеспечивающей повышение помехозащиты, можно выбрать модуляцию передатчика по частоте (рис. 43), при этом девиация (отклонение) радиочастоты должна быть пропорциональной амплитудам видеоимпульсов.

Для приема сигналов ИАМ—ЧМ в приемнике должны быть амплитудный ограничитель и частотный детектор. Ограничитель обеспечит подавление шумовых помех, а частотный детектор преобразует радиосигналы в последовательность амплитудно-модулированных видеоимпульсов, которые далее демодулируются описанным выше порядком.

Однако в большинстве существующих радиорелейных систем с уплотнением по времени задача повышения помехозащищенности решается выбором вида первичной модуляции, отличающегося от описанной импульсно-амплитудной модуляции. В последующих параграфах будут описаны эти более совершенные виды первичной модуляции.

Аппаратура временного уплотнения

Элементарная схема импульсной связи, которую мы рассмотрели на рис. 34, совмещала выполнение задач формирования и модуляции видеоимпульсов на передающей стороне и задач распределения и демодуляции импульсов на принимающей стороне. Но в действительности, как было сказано, такая схема невыполнима. В реальной аппаратуре уплотнения по времени перечисленные задачи выполняются отдельными электронными устройствами; кроме того, необходимо выполнять задачу синхронизации распределителей передающего и приемного концов линии связи. Разумеется, существует несколько вариантов осуществления уплотняющей аппаратуры; мы рассмотрим один из них, выполняемый с применением обычных электронных приборов и деталей.

На рис. 44 представлена структура передающей части четырехканальной аппаратуры временного уплотнения Исходным звеном

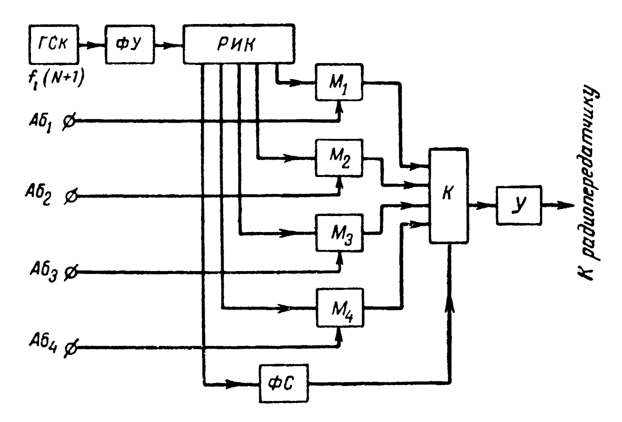


Рис. 44. Передающая часть четырехканальной аппаратуры уплотнения по времени.

ГСК—генератор синусоидальных колебаний; *ФУ*—формирующее устройство; *РИК*—распределитель импульсов каналов; *ФС*—формирование синхроимпульса; M_1, M_2, M_3 и M_4—модулятор первого, второго, третьего и четвертого каналов; *К*—коллектор; *У*—усилитель; $Аб_1$, $Аб_2$, $Аб_3$ и $Аб_4$—абонент первый, второй, третий и четвертый.

формирования импульсов служит генератор синусоидальных колебаний. Для надежной работы распределителей импульсов его частота должна быть стабильной, что достигается обычно применением в генераторе кварцевой стабилизации. Частота генератора равна тактовой частоте канала (8 000 *гц*), умноженной на число каналов плюс единица:

$$f_{\text{ген}} = f_1 (N+1),$$

где добавочная единица предназначена для выработки импульса синхронизации. В нашем примере генератор синусоидальных колебаний имеет частоту $8\,000(4+1) = 40\,000$ *гц*.

Для того чтобы под воздействием синусоидального напряжения получить импульсы заданной длительности, в состав аппаратуры входит формирующее устройство, которое содержит блоки, показанные на рис. 45: первый ограничитель, дифференцирующая схема и второй ограничитель.

Формирование импульсов начинается преобразованием синусоидального напряжения в напряжение (или ток) приблизительно

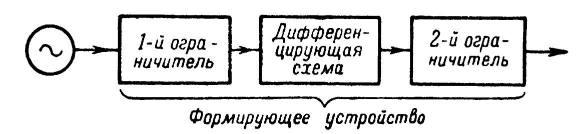


Рис. 45. Состав формирующего устройства.

прямоугольной формы. Это преобразование, показанное на рис. 46, выполняется при помощи двустороннего ограничителя (первого ограничителя схемы на рис. 45). Два диода, имеющих раздельные катоды, позволяют получить такое ограничение в схеме на рис. 46. Здесь на каждый из анодов действует отрицательное смещение. Токи через диоды не проходят до тех пор, пока какая-либо из полуволн входного напряжения не превысит величины смещения. При отсутствии тока напряжение на выходе следует за входным, так как нет падения напряжения на сопротивлении *R*. Если превышение наступило, то ток проходит через тот или иной диод и вызывает падение напряжения на сопротивлении *R*; с ростом тока увеличивается и падение напряжения на сопротивлении, в результате чего выходное напряжение остается приблизительно на постоянном уровне до тех пор, пока не прекратится ток через диод. Таким путем «срезаются» те части кривой синусоидального напряжения, которые лежат за порогами ограничения сверху и снизу. Двусторонний ограничитель может быть построен также с применением усилительных ламп или полупроводниковых приборов.

Как было показано на рис. 45, вторым блоком формирующего устройства является дифференцирующая схема. Название схемы говорит о том, что ее выходное напряжение пропорционально результату дифференцирования входного напряжения, т. е. скорости изменений входного напряжения.

Дифференцирующая схема — система линейная, т. е. она не создает новых частот, а лишь изменяет соотношения между амплитудами (и фазами) отдельных гармонических составляющих последовательности импульсов. Однако в результате этих изменений импуль-

сы на выходе схемы могут приобретать форму, существенно отличную от входных.

Простейшая дифференцирующая схема представляет собой последовательное соединение емкости C и сопротивления R (рис. 47). На вход этой схемы подается напряжение от первого ограничителя в виде импульсов с крутыми фронтами. Выходное напряжение снимается с сопротивления R. Такая схема сходна со схемой переходных элементов (разделительный конденсатор и сеточное сопротивление) в реостатных усилителях; однако здесь величины C и R выбираются совершенно на иных основаниях, чем в обычных усилителях. В дифференцирующей схеме произведение RC (именуемое «постоянной времени» схемы) должно быть гораздо меньше, чем в видеоусилителе. Это позволяет конденсатору C, получившему заряд, быстро разряжаться через сопротивление R.

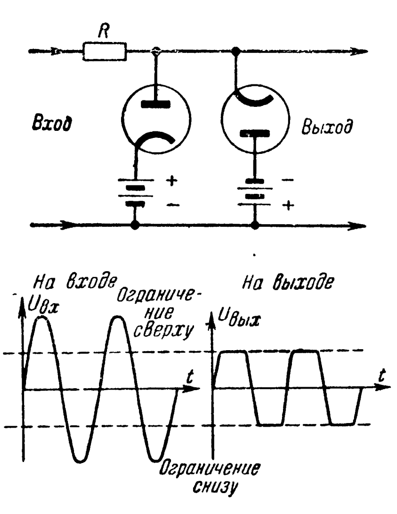


Рис. 46. Схема и процесс работы двустороннего ограничителя.

Процессы в дифференцирующей схеме показаны на рис. 47 на графиках слева. При отсутствии импульсов разряженный конденсатор представляет собой как бы короткозамкнутый участок цепи. Начало действия (передний фронт) входного импульса создает в цепи RC зарядный ток, для которого R служит единственным сопротивлением в этот момент. Следовательно, и напряжение на выходе дифференцирующей схемы в первый момент достигает скачком полного значения входного напряжения.

Но конденсатор быстро зарядится, ток i заряда прекратится, и, следовательно, напряжение iR на выходе упадет до нуля тем быстрее, чем меньше произведение RC. Так передний фронт входного импульса создает на выходе положительный импульс малой продолжительности и остроконечной формы.

В момент перемены знака импульса на входе (задний фронт) конденсатор перезаряжается, причем перезаряд начинается с резкого скачка тока в обратном направлении. В результате этого на выходных зажимах получается короткий импульс отрицательного напряжения (нижний график на рис. 47). Таким путем дифференцирующая цепь преобразует прямоугольные импульсы в короткие остроконечные импульсы с переменными знаками.

Но для аппаратуры уплотнения по времени нужны короткие импульсы одного знака и прямоугольной формы, а не остроконечные. Поэтому после дифференцирующей схемы включается еще один двусторонний ограничитель, способный, во-первых, не пропускать импульсы отрицательного знака и, во-вторых, «вырезать» из положительных импульсов прямоугольники желательной длительности. Эти

задачи решаются должным выбором уровней ограничения второго ограничителя в формирующем устройстве (правый график на рис. 47).

Формирование импульсов может осуществляться и иными схемами и методами, однако изложенный вариант находит широкое применение.

Возвращаясь к рис. 44, отметим, что наиболее сложным блоком аппаратуры следует считать устройство, распределяющее импульсы

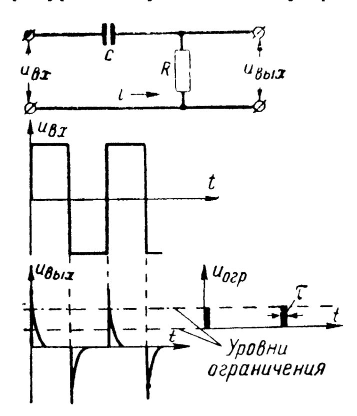


Рис. 47. Дифференцирующая схема и формирование коротких импульсов.

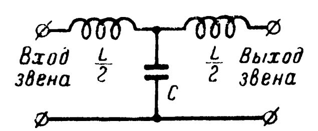


Рис. 48. Звено линии задержки.

каналов. Важнейшим элементом этого устройства является так называемая линия задержки. На нее возлагается задача замедлить, задержать на некоторое точно установленное время прохождение сигнала от входа к выходу. Задержка в пределах сотен микросекунд может быть осуществлена при помощи электрических систем.

Чаще всего применяются линии задержки, состоящие из емкостей и индуктивностей, включаемых однотипными звеньями. Схема звена линии простейшего типа, содержащая последовательные индуктивности $L/2$ и параллельную емкость C, представлена на рис. 48. Это — соединение элементов по принципу пропускания низких частот. Благодаря инерционным свойствам емкости и индуктивности импульс, поданный на вход звена, появляется на выходе с запаздыванием приблизительно на время $t_{з1} = \sqrt{LC}$. Общее время задержки $t_з \approx t_{з1} n$, где n — число звеньев в линии, практически доходящее до сотни и более.

Величины L и C выбираются из расчета пропускания спектра импульсов; высшая частота этого спектра, как мы знаем, приблизительно обратно пропорциональна длительности импульса. Должно быть удовлетворено соотношение $0{,}7/\tau \leqslant 1/2\pi\sqrt{LC}$. Кроме того, важным параметром линии является ее волновое сопротивление, также определяемое выбором L и C из соотношения $Z_0 \approx \sqrt{L/C}$. Все приведенные зависимости служат основой для расчета линии задержки.

Если последнее звено линии нагрузить на сопротивление, равное ее волновому сопротивлению Z_0, то импульсы не будут отражаться от конца линии, т. е. будут совершать вдоль линии только однократный пробег. Если же последнее звено оставить разомкнутым, то

импульс напряжения, дойдя до конца, отразится и с той же своей полярностью совершит обратный пробег.

Имеется возможность сделать отводы от разных звеньев фильтра и получать на этих отводах импульсы с разными задержками, как показано на рис. 49. Именно такая линия и составляет важную часть распределителя импульсов каналов.

Состав распределителя импульсов передающего устройства аппаратуры временнóго уплотнения показан на рис. 50. Мы видим, что с выхода описанного выше формирующего устройства вся последовательность импульсов (по пять одинаковых импульсов на каждый тактовый период) воздействует одновременно на входы блоков, названных селекторами каналов. Задача селектора состоит в том, чтобы пропускать на свой выход только импульсы своего канала; для этого селектор должен отпираться посторонним дополнительным импульсом именно в тот момент, когда на него воздействует от формирующего устройства импульс своего канала.

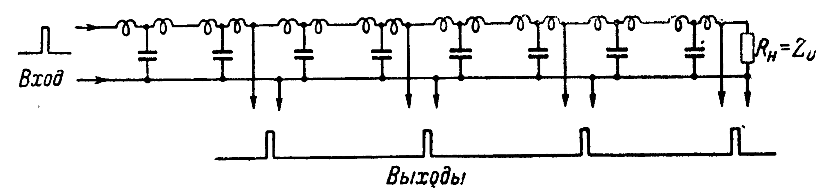


Рис. 49. Получение импульсов с разными задержками.

Отпирающие воздействия создаются комбинацией генератора тактовых импульсов и линии задержки. Линия характеризуется временем задержки 125 *мксек,* точно равным тактовому периоду. В начале каждого тактового периода генератор посылает в линию один импульс, несколько удлиненный по времени в сравнении с импульсами формирующего устройства. Но этот импульс строго синхронизирован с импульсом *СИ* (верхний график на рис. 50), исходящим из устройства формирования. Синхронизация достигается следующим способом. Генератор тактовых импульсов представляет собой спусковую схему (триггер), дающую импульс выходного напряжения лишь при о д н о в р е м е н н о м воздействии напряжений н а д в а в х о д а этой схемы. На один вход генератора воздействуют сформированные импульсы, а на другой — импульс с выхода линии задержки. Учитывая, что время задержки равно 125 *мксек*, мы убеждаемся в посылке импульсов от генератора такта в линию с частотой 8 000 *гц*. Заметим, что генератор тактовых импульсов обладает со стороны выхода линии входным сопротивлением, равным волновому сопротивлению линии, чем устраняются отражения от конца линии.

Линия имеет отводы, расстояния между которыми соответствуют времени пробега по $125/N+1$ *мксек* (в нашем примере — по 25 *мксек*). Импульс, посланный генератором, движется вдоль линии, проходя мимо отводов и создавая на них поочередно напряжение. При совпадении во времени тактового импульса на каком-либо отводе с импульсом от формирующего устройства соответствующий селектор получает двойное воздействие и «отпирается», пропуская импульс данного номера. На рис. 50 (второй график) показаны для

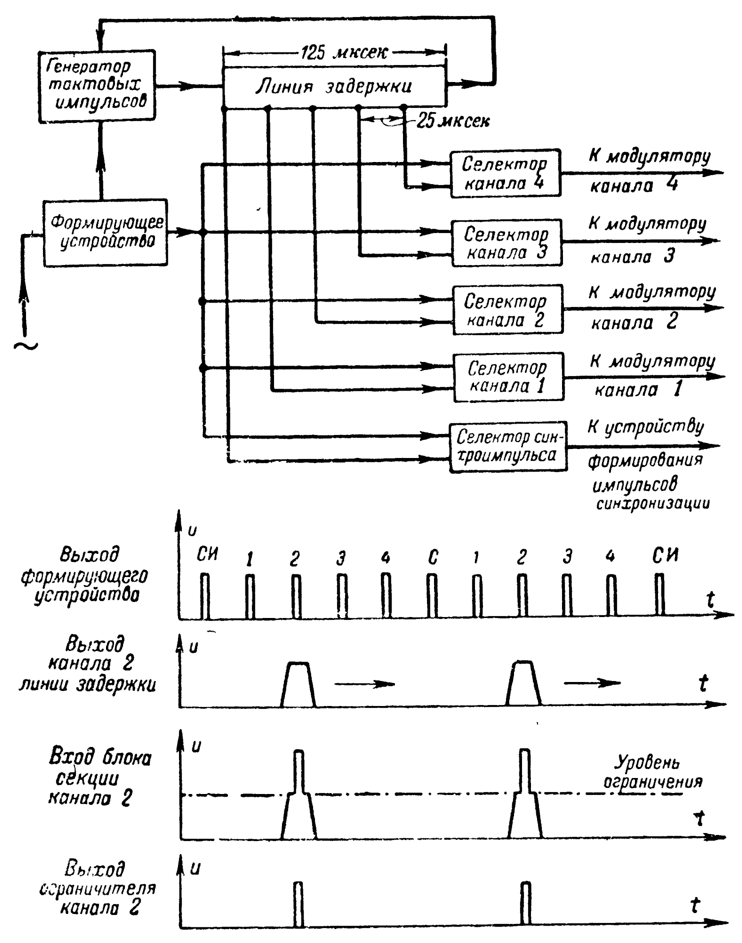


Рис. 50. Состав распределителя импульсов передающей части и процессы в нем.

примера те моменты, когда тактовый импульс проходит через отвод второго канала и изображается «подставкой» для импульсов второго канала, благодаря чему селектор может отделить импульсы своего канала простым ограничением снизу.

Практически находят более широкое применение селекторы на лампах двойного управления: анодная цепь лампы заперта до тех пор, пока не будут поданы одновременно напряжения на две управляющие сетки. При совпадении во времени импульса канала и тактового импульса лампа отпирается и на ее анодной нагрузке получается импульс, по длительности и форме соответствующий импуль-

су канала (нижний график на рис. 50). Таким путем импульсы каналов распределяются к своим модуляторам (рис. 51).

На управляющие сетки всех пяти селекторных ламп воздействуют полностью импульсы от формирующего устройства. На вторые сетки воздействует поочередно тактовый импульс, движущийся вдоль линии задержки. На выходах селекторов появляются только те импульсы, которые удовлетворяют условию совпадения во времени основных и отпирающих напряжений. Селектор, как и любой реостатный усилитель, создает на выходе импульс обратной полярности, так как с повышением напряжения на сетке уменьшается напряжение на аноде.

Самостоятельным селектором выделяется импульс, предназначенный для синхронизации распределителя приемного устройства

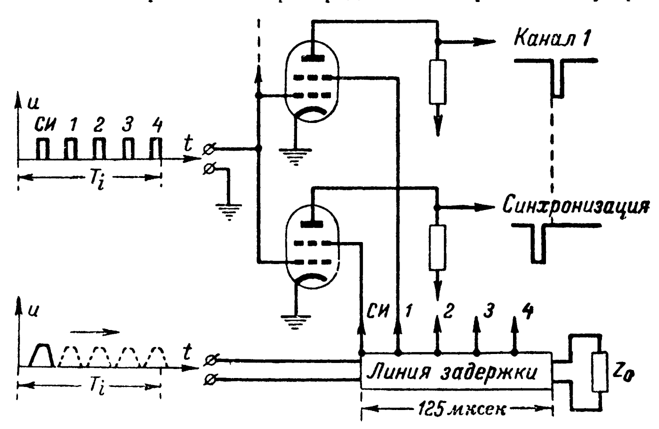


Рис. 51. Схема и работа селекторов каналов

корреспондента. Синхронизирующий импульс (синхроимпульс) должен по какому-либо признаку отличаться от импульсов каналов. Для этого он направляется после селектора в свой блок формирования. Отличительным (маркирующим) признаком импульса синхронизации может быть, например, увеличенная длительность (ширина) в сравнении с импульсами каналов; применяется также преобразование о д и н о ч н о г о импульса в д в о й н о й. На этом последнем варианте мы и остановимся.

В качестве формирующего устройства в этом варианте служит каскад усиления, в котором параллельно нагрузочному сопротивлению R включен вход линии задержки (рис. 52). Линия разомкнута на выходе. Волновое сопротивление линии Z_0 равно сопротивлению R на входном ее конце. Время задержки линии выбирается равным длительности импульса τ. Импульс, отраженный от разомкнутого конца линии, возвращается к началу через промежуток времени 2τ после посылки и вновь создает напряжение на сопротивлении R. Значит, одиночный импульс превращается в два импульса, разделенные промежутком времени τ.

Импульсы каналов подвергаются модуляции в индивидуальных модуляторах, на каждый из которых одновременно со своей после-

довательностью импульсов воздействует разговорное напряжение соответствующего абонента (см. рис. 44). Коллектор (собиратель) импульсов, к которому подключены выходы всех модуляторов и синхронизации, может представлять собой, например, группу усилительных ламп, каждая из которых получает на сетку импульсы своего канала, но в анодных цепях которых включено одно общее нагрузочное сопротивление. При отсутствии модуляции в каналах с выхода коллектора на общий усилитель поступает последовательность импульсов, изображенная на рис. 53.

Теперь рассмотрим приемную часть аппаратуры временно́го уплотнения. Структура четырехканального устройства дана на рис. 54. От выхода радиоприемника через видеоусилитель к аппаратуре распределения поступают импульсы в последовательности, показанной на рис. 53, но импульсы каналов модулированы разговорными токами соответствующих абонентов противоположного конца радиолинии. Для разделения каналов требуется открывать селекторы этих каналов поочередно через установленные промежутки времени. Следовательно, наиболее сложную часть аппаратуры составляют ее блоки, обеспечивающие управление селекторами, т. е. распределение импульсов по каналам для их последующей демодуляции.

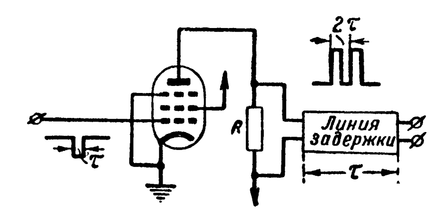


Рис 52. Схема и работа блока формирования импульсов синхронизации.

Основой распределителя (коммутатора) каналов является линия задержки, нагруженная на сопротивление, которое равно волновому



Рис. 53. Последовательность импульсов на выходе передающей части аппаратуры (без модуляции).

ее сопротивлению Z_0, т. е. линия с однократным «пробегом» импульса. Единственный импульс, посылаемый в линию за каждый тактовый период, есть импульс синхронизации. Он выделяется из принимаемой последовательности селектором синхронизации. Значит, частота его повторения задается передающей аппаратурой станции-корреспондента.

Признаком, позволяющим выделить синхронизирующую посылку, служит в нашем случае то обстоятельство, что она состоит из двух импульсов, разделенных промежутком времени τ (рис. 53). Селектор синхронизации состоит из разомкнутой на конце линии задержки и усилительной лампы, поставленной выбором сеточного смещения в режим ограничения снизу (рис. 55). Время задержки линии равно длительности τ одного импульса. На сетку лампы воз-

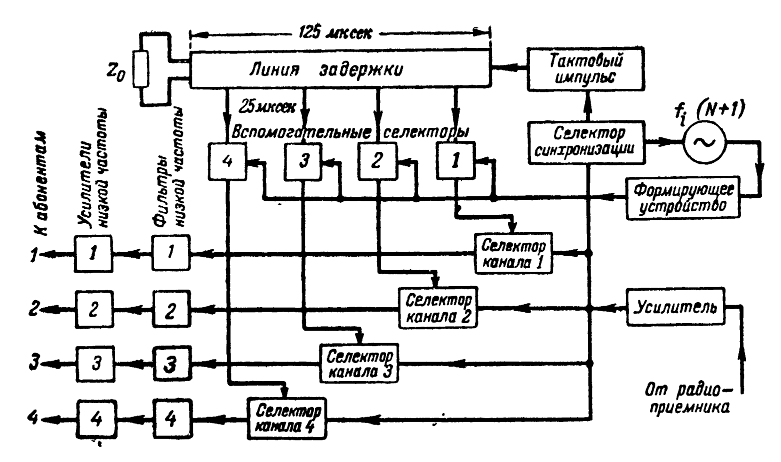


Рис. 54. Приемная часть четырехканальной аппаратуры уплотнения по времени.

действуют импульсы с выхода видеоусилителя, а также импульсы, отражающиеся от конца линии и возвращающиеся к ее началу спустя время 2τ. Суммируя те и другие, мы получим нижний график на рис. 55, из которого видно, что один из импульсов синхро-

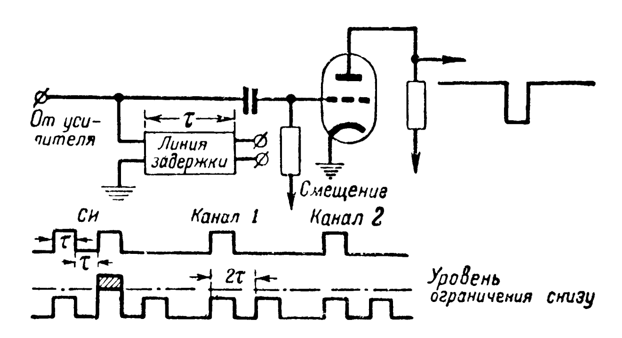


Рис. 55. Схема и работа селектора импульсов синхронизации.

низации *СИ* приобретает удвоенную высоту в результате наложения отраженного на первичный. Уровень ограничения проходит над импульсами нормальной высоты, и селекторная лампа выделяет только один импульс, удвоенный по высоте. Он и поступает на выход селектора.

Селектор синхронизации обеспечивает работу всего распределителя, синхронную с тактом принимаемых импульсов. Этот селектор имеет два выхода — основной и дополнительный. По основному выходу он управляет генератором тактовых импульсов, который посы-

лает в линию задержки распределителя за тактовый период также по одному импульсу, но с увеличенной длительностью. Четыре отвода от линии задержки получают поочередно (через 25 *мксек*) напряжения от бегущего импульса и могут, по существу, управлять селекторами соответствующих каналов.

Однако форма и длительность бегущего импульса в линии искажаются, и для большей точности работы селекторов каналов оказывается целесообразным этап предварительного формирования отпирающих импульсов. Для этого имеется дополнительный выход селектора синхронизации (рис. 54) к резонансному усилителю-умножителю. Этот умножитель содержит контур, настроенный на частоту $f_i(N+1)$, т. е. на высшую гармонику последовательности импульсов синхронизации. Синусоидальное напряжение этой гармоники

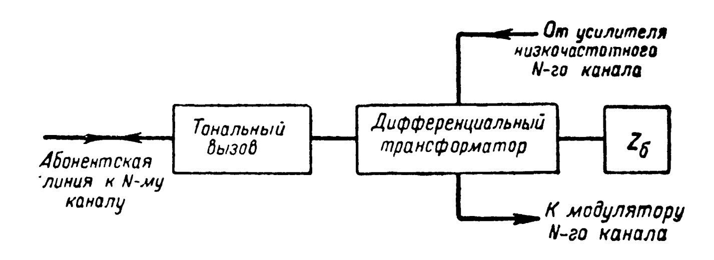


Рис. 56. Переход от двухпроводной абонентской линии на четырехпроводный канал уплотняющей аппаратуры.

превращается в известном нам формирующем устройстве в последовательность прямоугольных импульсов, которые совместно с выходами линии задержки управляют вспомогательными селекторами каналов. Для импульсов синхронизации вспомогательный селектор не нужен.

Стандартные по длительности и по форме импульсы с выходов вспомогательных селекторов управляют основными селекторами импульсов каналов, разделяя эти импульсы и направляя их к своим абонентским выходам. Если бы на передающей стороне модуляция импульсов в каждом канале была амплитудная, то для демодуляции достаточно было бы включить после селекторов фильтры нижних частот, а для получения требующейся выходной мощности дополнить выходы усилителями низкой частоты (рис. 54). Но ниже мы познакомимся с такими методами модуляции, которые необходимо перед демодуляцией преобразовывать из одного вида в другой. Будем считать, что в этих случаях функция преобразования возлагается дополнительно на блоки селекции каналов.

В заключение нужно указать, что каждая абонентская двухпроводная линия соединяется с входом и выходом соответствующего канала аппаратуры уплотнения через описанную выше дифференциальную систему (рис. 56). В линию включено устройство тонального вызова. Количество дифференциальных систем в аппаратуре уплотнения равно числу каналов.

ГЛАВА ПЯТАЯ

ВИДЫ ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИИ

Импульсно-фазовая модуляция

В предыдущей главе было дано понятие о модуляции импульсов по амплитуде, о демодуляции такой передачи и о возможности применения этого метода при уплотнении радиорелейной аппаратуры. Там же указывалось, что амплитудная модуляция сама по себе не обеспечивает возможностей подавления шумовых помех в приемном устройстве и требует помехозащищенной частотной модуляции несущего колебания радиопередатчика.

Однако импульсная радиосвязь имеет следующую особенность: располагая данной средней мощностью радиопередатчика, можно концентрировать энергию в виде радиоимпульсов, прекращая излучение в промежутках между импульсами. Тогда мощность в импульсе будет больше средней мощности передатчика. Но для такой концентрации энергии удобнее модуляция радиопередатчика по амплитуде, нежели по частоте. Заметим попутно, что повышенная мощность в импульсе связана с повышением напряжений в радиочастотных элементах схемы. Это обстоятельство не осложняет задач изоляции в обычных радиорелейных станциях, где мощности даже в импульсах не превышают обычно десятков ватт. Но в станциях тропосферной связи, имеющих средние мощности от киловатта и более, концентрация энергии в импульсах усложнила бы требования к изоляции, а потому методы временно́го уплотнения с амплитудной модуляцией колебаний СВЧ для тропосферной связи менее удобны, чем методы частотного уплотнения.

Принимая для радиорелейных станций с временны́м уплотнением радиочастотную (вторичную) модуляцию по амплитуде, мы должны остановиться на таком виде первичной модуляции импульсов, который обеспечил бы повышенную помехозащищенность. Одним из таких видов модуляции является и м п у л ь с н о - ф а з о в а я м о д у л я ц и я (ИФМ). Она довольно широко применяется в радиорелейных линиях в сочетании с амплитудной радиочастотной модуляцией (ИФМ—АМ).

Принцип модуляции импульсов по фазе (по фазовой позиции) демонстрируется на рис. 57. Здесь мы видим несколько тактовых периодов четырехканальной аппаратуры уплотнения, рассмотренной в предыдущей главе. Модуляции по фазе подвергаются в данном случае импульсы второго канала. По вертикали штрих-пунктиром развернуто модулирующее разговорное напряжение в т о р о г о абонента. Сущность модуляции заключается в том, что фазовая позиция импульса отклоняется от средней пропорционально мгновенному значению модулирующего напряжения (не выходя из пределов промежутка времени $t_к$, отводимого для одного канала). При действии положительного модулирующего напряжения импульс канала посылается раньше, а при действии отрицательного напряжения — позднее среднего момента. Эффект модуляции оценивается наибольшим отклонением (девиацией) Δt переднего фронта импульса от своего среднего положения.

В чем же преимущество импульсно-фазовой модуляции по сравнению с импульсно-амплитудной? Вполне очевидно, что модуля-

ция по амплитуде не допускает применения в приемнике амплитудных ограничителей, так как ограничитель нарушил бы закон модуляции. При фазовой модуляции все импульсы имеют одинаковую высоту, а потому закон модуляции (т. е. закон размещения импульсов во времени) не нарушается ограничителем. Вместе с тем ограничитель с правильно выбранными уровнями ограничения устраняет изменения высоты импульсов, создаваемые шумовыми помехами.

На рис. 58,*а* мы видим сверху импульсы прямоугольной формы с вероятными пределами случайных шумовых напряжений, налагающихся на вершины импульсов и существующих в интервалах между импульсами. После двустороннего ограничения (и усиления) импульсы полностью очищены от помех. Однако в действительности при прохождении через аппаратуру радиолинии импульсы не могут сохранить прямоугольной формы и становятся трапециевидными. Причиной этого является ограниченность полосы пропускания тракта и разница во времени пробега по линии для отдельных частотных составляющих последовательности импульсов. В таком случае шумовое напряжение изменяет не только высоту, но и фазовые положения наклонных фронтов импульсов (рис. 58,*б*). Ограничитель устраняет шумовые изменения высоты импульсов, но не устраняет случайных перемещений их фронтов; однако перемещения (паразитная модуляция по фазе) значительно меньше, чем изменения высоты, а потому помехозащищенность за счет ограничения повышается. В этом и состоит преимущество импульсно-фазовой модуляции перед импульсно-амплитудной. В качестве вторичного этапа вполне возможно применение амплитудной модуляции (ИФМ—АМ).

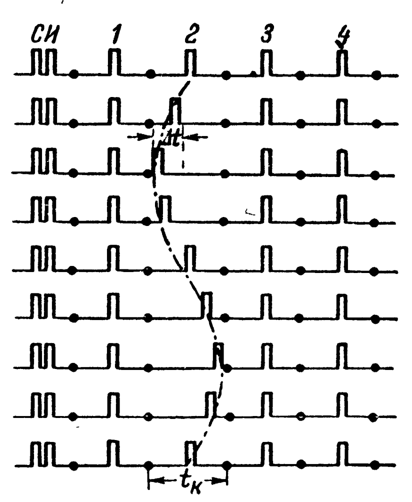


Рис. 57. Импульсно-фазовая модуляция во втором канале.

Описание процессов импульсно-фазовой модуляции и демодуляции рассмотрим применительно к схемам, выполняемым из обычных радиодеталей и электронных приборов.

В импульсно-фазовом канальном модуляторе (рис. 44) последовательность импульсов канала претерпевает несколько этапов преобразования, которые развернуты на рис. 59. Первый этап — превращение прямоугольных немодулированных импульсов канала в импульсы пилообразной формы (рис. 59,*а* и *б*). Это выполняется следующим путем: каждый импульс практически мгновенно заряжает конденсатор, который разряжается током неизменной величины (например, через пентод), благодаря чему фронт разряда получается линейным. Пилообразное напряжение суммируется с модулирующим

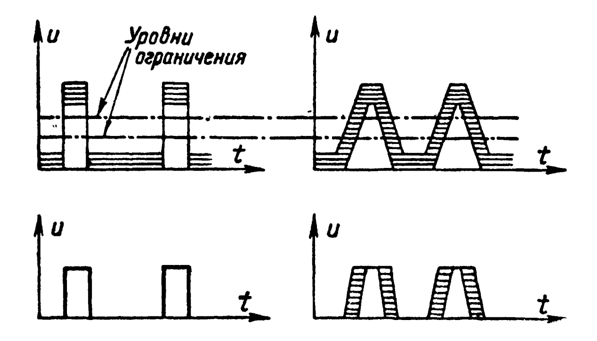


Рис. 58. Подавление шумов с помощью ограничителя.

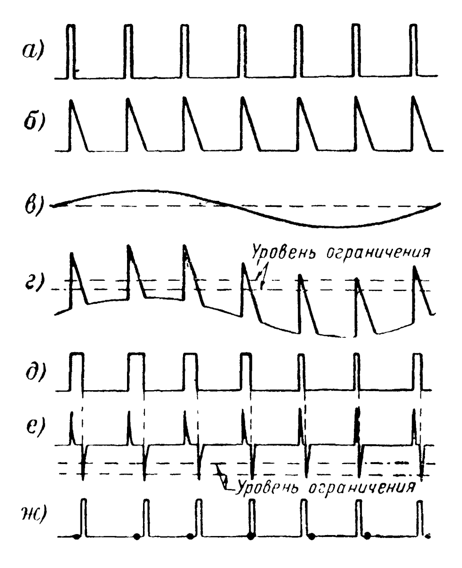


Рис. 59. Процессы в импульсно-фазовом модуляторе.

разговорным напряжением (рис. 59,*в* и *г*) и совместно воздействуют на вход двустороннего ограничителя-усилителя. На выходе последнего образуются практически прямоугольные импульсы, модулированные по длительности (по ширине). Из геометрических соотношений очевидно, что перемещения заднего фронта (рис. 59,*д*) пропорциональны мгновенным значениям модулирующего напряжения.

Далее импульсы, модулируемые по длительности, воздействуют на дифференцирующую схему, на выходе которой включен еще один двусторонний ограничитель (рис. 59,*е*). Из результатов дифференцирования задних (подвижных) фронтов формируются импульсы, модулированные по фазе (рис. 59,*ж*). Наличие фазовой модуляции видно из сопоставления действительных позиций импульсов и средних их положений, помеченных точками. В этом последнем виде

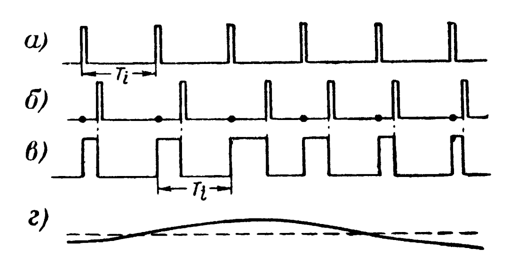


Рис. 60. Процессы демодуляции импульсов, модулированных по фазе.

импульсы канала и направляются в коллектор каналов и далее поочередно с импульсами других каналов управляют радиопередатчиком.

Изложенный способ модуляции импульсов по фазе не требует блоков с обратными связями, благодаря чему модулятор оказывается надежным и удобным для регулировок. Однако известны многочисленные схемы модуляторов, использующие каскады с обратными связями (триггерные схемы); число блоков в таких схемах может быть меньшим.

Процессы демодуляции, имеющие место в селекторах каналов приемной части аппаратуры уплотнения (рис. 54), представлены на рис. 60. Мы знаем, что вспомогательные селекторы формируют для каждого канала свою последовательность импульсов с частотой такта (период T_i), что и показано на рис. 60,*а*. Эти импульсы воздействуют на первый вход селектора канала и создают на его выходе напряжение, сохраняющееся неизменным вплоть до воздействия импульса канала на второй вход селектора. Значит, вспомогательные импульсы являются «включающими», а импульсы каналов — «выключающими» выходное напряжение селектора. Но импульсы канала модулированы по фазе, т. е. их запаздывание по отношению к вспомогательным импульсам изменяется (рис. 60,*б*). Благодаря этому на выходе селектора получаются импульсы, модулированные по длительности (рис. 60,*в*). В этом процессе одновременно обеспечивается и селекция импульсов данного канала, так

как импульсам чужих каналов не предшествуют вспомогательные импульсы, и селектор остается «выключенным».

Преобразование модуляции по фазе в модуляцию по длительности необходимо из следующих соображений. В спектре импульсной последовательности с фазовой модуляцией полезная составляющая звуковой частоты F (рис. 40) имеет очень малую амплитуду по сравнению с амплитудой самих импульсов; кроме того, эта амплитуда относительно уменьшается с уменьшением модулирующей частоты, что зависит от степени «разрежений» и «сгущений» импульсов при фазовой модуляции разными звуковыми частотами. При модуляции по длительности возможно неискаженное выделение разговорного тока с помощью фильтра нижних частот, как и при импульсно-амплитудной модуляции (рис. 60, *г*).

Простейшая схема селектора-преобразователя изображена на рис. 61. Две лампы, работающие совместно, имеют общий выход с анода левой лампы на сопротивление R, но два разных входа на

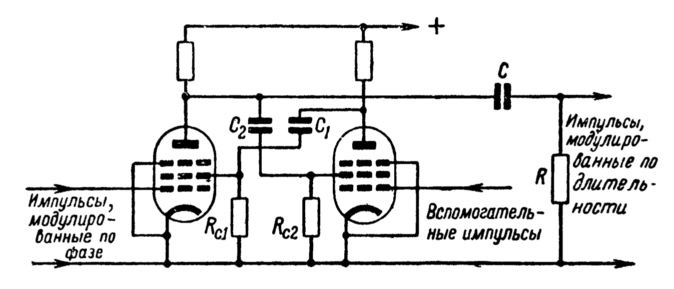


Рис. 61 Схема селектора канала с преобразованием модуляции по фазе в модуляцию по длительности.

управляющие сетки. На вход правой лампы воздействует вспомогательный тактовый импульс. Он вызывает увеличение ее анодного тока и понижение напряжения на ее аноде. Это повлечет за собой разряд конденсатора C_1 через сопротивление R_{c1}, и на второй сетке левой лампы появится отрицательное смещение. Левая лампа запрется, вследствие чего напряжение на ее аноде возрастет скачком, который и явится началом импульса на выходе.

С этого же момента конденсатор C_2 будет заряжаться под действием повысившегося напряжения, а ток заряда создаст на сопротивлении R_{c2} положительное смещение для второй сетки правой лампы, поддерживающее величину ее анодного тока и по окончании вспомогательного импульса.

Еще до того момента, когда на конденсаторах C_1 и C_2 будут достигнуты установившиеся значения напряжений, на левом входе появится импульс своего канала. Левая лампа пропустит анодный ток, из-за чего упадет напряжение на ее аноде и, следовательно, закончится импульс напряжения на выходе схемы. Теперь лампы меняются ролями: конденсатор C_2 разряжается, а C_1 заряжается. Такое состояние поддерживается вплоть до момента воздействия нового вспомогательного импульса на вход правой лампы. Таким путем модуляция фазы импульсов преобразуется в модуляцию их длительности с одновременной селекцией импульсов данного канала.

Импульсно-кодовая модуляция

Все виды модуляции импульсов, о которых говорилось выше, характеризуются тем, что под воздействием первичного сигнала (разговорного тока) изменяется тот или иной параметр последовательности импульсов (амплитуда, фазовое положение, длительность). Но имеются и такие виды модуляции импульсов, когда под воздействием первичного сигнала создаются те или иные пропуски в регулярной последовательности импульсов. К таким видам относятся импульсно-кодовая модуляция и импульсно-разностная модуляция (иначе называемая «дельта-модуляцией»).

Название «модуляция» нельзя относить к этим видам безоговорочно, так как под этим термином мы привыкли понимать управление каким-либо параметром переносчика сигнала; здесь же признаком сигнала служит само наличие или отсутствие импульсов. Можно сказать, что в этих случаях «модуляция» ведется по способу «есть импульс» или «нет импульса».

Целесообразность передачи речи по способу «есть—нет» обосновывается достижением повышенной помехозащищенности приема. Нам уже известно, что действие помех при импульсной связи состоит в искажении принимаемых импульсов. Но системы модуляции по способу «есть — нет» позволяют сохранить высокое качество воспроизведения сигналов даже в том случае, когда форма принимаемых сигналов искажена помехами (если только помехи не могут создать лишних импульсов или полностью подавить приходящие).

Это достигается благодаря тому, что в приемной аппаратуре, подвергающейся действию импульсов сигнала, одновременно и непрерывно генерируется своя последовательность регулярных импульсов, которая контролируется системой синхронизации работы передающего и принимающего концов радиолинии. Эта «местная» последовательность калиброванных импульсов проходит к демодулятору приемной аппаратуры не полностью: проходят только те импульсы, которые совпадают по времени с импульсами принимаемого сигнала. Иначе говоря, импульс сигнала открывает путь для местного импульса к демодулятору.

Но замечательно то, что местные импульсы, сформированные в самом приемнике, не подвергаются искажающему действию помех, а потому перед демодуляцией форма принимаемых сигналов полностью восстанавливается (регенирируется). Искажение передаваемой речи возможно лишь при помехах столь высокого уровня, что они способны открыть путь «лишним» местным импульсам без сигнала или же полностью подавить часть импульсов сигнала.

Принцип регенерации формы импульсов поясняется на рис. 62. Верхний график изображает регулярную последовательность местных импульсов; второй — принятые импульсы, искаженные вследствие ограниченности полосы пропускания линии и в результате воздействия помех. Далее ограничитель «вырезает» средние полоски принимаемых импульсов, и они в схеме совпадения открывают путь к демодулятору только для соответствующих по времени местных импульсов.

Именно такая возможность повышения помехозащищенности привлекает в первую очередь внимание к системам, обеспечиваю-

щим регенерацию импульсов Системы связи, перечислявшиеся выше, допускали селекцию сигнала по частоте и по амплитуде; здесь же оказывается дополнительно возможной селекция по времени (в схеме совпадения местных импульсов с принимаемыми). Кроме того, некоторые зарубежные авторы отмечают, что импульсно-кодовая и импульсно-разностная системы модуляции дают выгодные возможности к закрытию содержания передаваемых сообщений.

Импульсно-кодовой модуляцией (ИКМ) называется преобразование разговорного тока в комбинации однотипных импульсов. Название говорит о принципиальном сходстве этого процесса с кодированием букв и цифр в телеграфном сообщении.

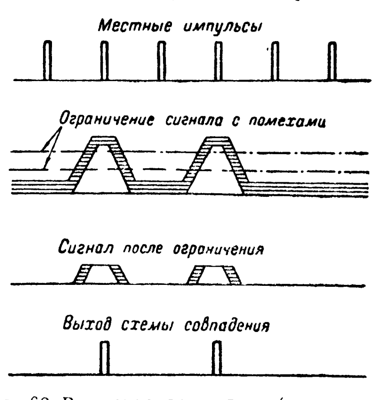


Рис. 62. Регенерация импульсов (селекция по времени).

Первый шаг преобразования—это знакомая нам амплитудная модуляция разговорным током регулярной последовательности импульсов, имеющих частоту повторения 8 000 *гц* и получаемых с выхода формирующего устройства (рис. 63). В результате этого преобразования получаются импульсы, величина которых отображает дискретные значения непрерывного сигнала. Будем называть их «импульс-пробами»: они как бы производят «пробы» значений первичного сигнала через промежутки времени по 125 *мксек* и согласно теореме Котельникова несут в себе возможность воспроизведения сигнала.

Следующий шаг преобразования — приближенное выражение импульс-проб кодовыми комбинациями калиброванных импульсов (рис. 63). Заранее устанавливается для данного типа аппаратуры максимальное число импульсов («значность» кода). Чем точнее желательно передать величины кодируемых импульс-проб, тем большей должна быть «значность» кода. Для профессиональной связи достаточен пятизначный код, для художественной передачи требуется код семизначный. Чтобы не усложнять рисунков, мы ограничимся изображением трехзначного кода, т. е. будем считать, что кодовая группа может содержать не более трех импульсов.

N-значный код дает, как известно из элементарной алгебры, 2^N комбинаций, если комбинируются два элемента: импульс и отсутствие импульса (т. е. пауза). Такой код называется двоичным. Каждому импульсу в зависимости от его места в кодовой группе присваивается определенное числовое значение передаваемой величины (уровня) импульс-проб. Эти значения возрастают слева направо по двоичной системе счисления: первый импульс имеет «цену» в 1 единицу; второй — в 2 единицы, третий — в 4 единицы и т. д. В нашем примере трехзначного кода наибольшее значение уровня составит $1+2+4=7$ единиц, а наименьшее — нуль (отсутствие импульсов в кодовой группе). Следовательно, мы имеем в данном при-

мере возможность передавать кодовыми группами восемь условных дискретных значений высоты импульс-проб (от 0 до 7).

Замена передачи непрерывного сообщения передачей лишь конечного числа дискретных уровней называется квантизацией (квантованием) сообщения. Если истинная высота импульс-пробы находится между двумя значениями дискретных уровней, то импульс-проба преобразуется в кодовую комбинацию, числовое значение которой соответствует ближайшему из этих уровней (рис. 63). Очевидно, что при этом передача сопровождается ошибкой, искажающей сообщение. Практически такие ошибки проявляются при приеме в виде шума, на фоне которого слышен сигнал (шум квантизации). Чем выше значность кода, тем ниже шум квантизации.

Следовательно, возможность восстановления формы импульсов, т. е. высокая помехозащищенность связи, достигается либо появлением специфического шума квантизации, либо, при высокой значности кода, существенным усложнением аппаратуры. Нужно иметь в виду, что в многоканальной линии с импульсно-кодовой модуляцией между кодовыми группами данного канала должны быть промежутки времени для размещения кодовых групп других каналов. Возможное число каналов при этом окажется меньше, чем, например, для импульсно-амплитудной модуляции, так как вместо одного импульса передается группа, состоящая из нескольких импульсов; поэтому время $t_к$, отводимое на один канал, должно быть увеличенным. В известной мере это усложнение компенсируется менее строгими требованиями к воспроизведению формы импульса на приемном конце при учете последующей регенерации.

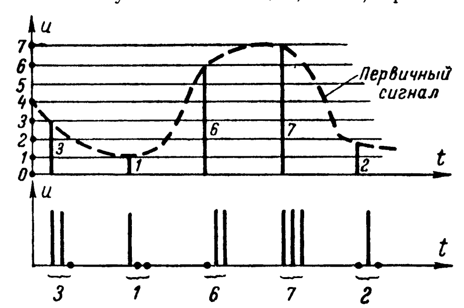


Рис. 63. Процессы кодирования телефонной передачи.

Одним из остроумных решений задачи квантизации и кодирования импульс-проб является применение специальной кодирующей трубки, схема основных электродов которой изображена на рис. 64. Здесь показаны: электронная пушка (подобная применяемым в других видах электронно-лучевых приборов), две пары отклоняющих пластин (x и y), скважная кодирующая пластина и сплошная собирательная пластина. Скважная пластина перпендикулярна оси потока (луча) электронов. Отверстия в ней соответствуют всем возможным комбинациям импульсов и пауз в кодовых группах. На рисунке представлено устройство для описанного выше трехзначного бинарного кода: отверстия образуют три столбца и восемь горизон-

тальных рядов. Число вертикальных столбцов соответствует значности кода, а число горизонтальных рядов — числу передаваемых дискретных уровней амплитуд импульс-проб, т. е. числу комбинаций. В данном случае мы имеем восемь дискретных уровней.

Импульс-пробы (рис. 63) предварительно подвергаются удлинению на время, отводимое для кодовой группы. В составе удлиняющего блока в простейшем случае имеется конденсатор, заряжаемый быстро от импульс-пробы и приобретающий напряжение этого импульса, а затем сохраняющий это напряжение в течение заданного времени и быстро разряжаемый соответственно задержанным местным импульсом формирующего устройства.

Напряжение, получаемое от блока удлинения, прилагается к y-пластинам. Тем самым луч электронов перемещается вверх по левой стороне скважной пластины. На время действия удлиненного импульса луч сохраняет по вертикали положение, которое соответствует ступени квантизации, ближайшей к амплитуде данного импуль-

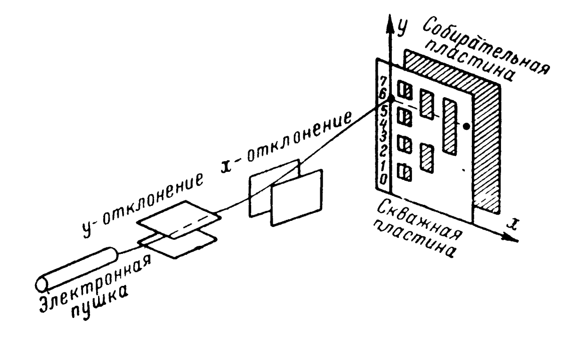


Рис. 64. Схема основных электродов кодирующей трубки.

са. Одновременно с вертикальным отклонением луч подвергается перемещению по горизонтали за счет подачи на x-пластины напряжения пилообразной формы от местного генератора, также синхронизируемого формирующим устройством. Дойдя до правой стороны скважной пластины, луч гасится и возвращается в исходное положение (в левый нижний угол пластины).

При описанном горизонтальном перемещении луча его электроны проходят сквозь отверстия и падают на собирательную пластину, к которой присоединена выходная цепь электронной трубки. В выходной цепи создается серия импульсов, образующая кодовую группу данного уровня. На рис. 64 пунктиром показано прохождение луча через отверстия второго и третьего столбцов, что соответствует уровню импульс-пробы 2+4=6 единиц.

Устройство кодирующей трубки усложняется деталями, обеспечивающими квантизацию уровней импульс-проб, т. е. исключающими возможность проникновения электронов одновременно в отверстия двух горизонтальных рядов. Внешние же блоки дополняются схемой совпадения, восстанавливающей форму выходных импульсов трубки.

Получаемые в описанных процессах кодовые группы калиброванных импульсов управляют колебаниями радиопередатчика. Вто-

ричная (радиочастотная) модуляция может быть либо амплитудной (ИКМ—АМ), либо частотной (ИКМ—ЧМ).

В приемном устройстве второго конца линии импульсно-кодовой связи выполняются обратные преобразования по сравнению с описанными выше операциями передающего устройства. После радиочастотного детектирования, необходимого усиления и восстановления формы импульсов нужно каждую кодовую группу превратить в один импульс, высота которого равнялась бы сумме «цен» переданных импульсов (это — процесс декодирования), а затем при помощи фильтра нижних частот выделить из полученных амплитудно-модулированных импульсов разговорный ток (это — процесс демодуляции). Кроме того, в приемной аппаратуре уплотненной линии между этапами декодирования и демодуляции должно производиться распределение импульсов по соответствующим каналам.

Процесс декодирования выполняется устройствами, которые могут быть отнесены к классу «накопляющих» электрических систем. В подобном устройстве конденсатор-накопитель заряжается последовательно импульсами кодовой группы. Напряжения, созданные отдельными импульсами, суммируются, и к моменту окончания всей группы напряжение на конденсаторе равно сумме напряжений всех импульсов группы. Но эта сумма пропорциональна высоте переданной импульс-пробы с погрешностью до половины ступени квантизации. Если с накопителя декодирующего устройства снимать напряжение в конце каждой группы, то будет получена последовательность амплитудно-модулированных импульсов, содержащих разговорный ток. Описанные процессы декодирования и демодуляции развернуты на рис. 65. Сопоставляя форму разговорного тока на этом рисунке с формой первичного сигнала на рис. 63, можно обнаружить искажения, обусловленные погрешностями квантизации, которые при трехзначном коде велики.

Один из возможных принципов декодирования представлен условной схемой и графиками на рис. 66. Принимаемые импульсы кодовых групп, пройдя через устройство регенерации, воздействуют на электронный переключатель, условно изображенный подвижным контактом на три положения. Каждый приходящий импульс перебрасывает контакт из нейтрального положения *2* в положение *1*, подключая на время своей длительности сочетание конденсатора C и сопротивления R к батарее. Благодаря наличию большого дополнительного сопротивления R_1 ток заряда конденсатора в течение длительности импульса практически постоянен и не зависит от наличия остаточного напряжения на конденсаторе. Следовательно, напряжение на конденсаторе в течение длительности импульса возрастет линейно на определенную величину. На рис. 66 эта величина равна восьми условным единицам напряжения.

В течение свободного интервала времени контур RC отключается от батареи и конденсатор C разряжается через сопротивление R. Постоянная времени RC выбирается такой, что за один временно́й интервал внутри кодовой группы напряжение на конденсаторе убывает ровно в 2 раза; благодаря этому к концу кодовой группы напряжение, созданное каждым импульсом, приобретает значение, равное «цене» данного импульса в двоичной системе счисления. Суммарное же напряжение равно сумме «цен» всех импульсов кодовой группы, т. е. пропорционально значению квантизированной им-

пульс-пробы. По окончании кодовой группы переключатель перебрасывается в положение *3*, выдавая на выход импульс суммарной высоты.

На рис. 66 в качестве иллюстрации показано декодирование двух групп трехзначного кода. Первая группа (010) дает конденсатору заряд в 8 единиц в течение длительности импульса, занимающего

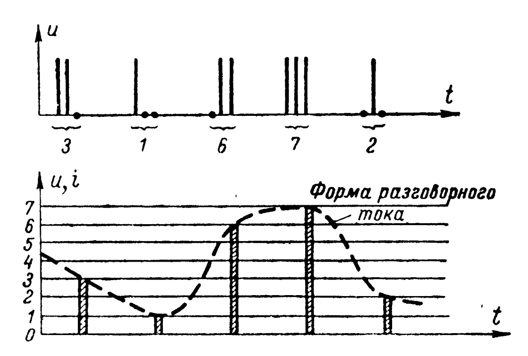


Рис. 65. Процессы декодирования и демодуляции телефонной передачи.

в кодовой группе второе место, т. е. имеющего «цену» в 2 единицы. К середине следующего интервала напряжение на конденсаторе падает до 4 единиц, а по окончании кодовой группы — до 2 единиц. Именно в этот последний момент переключатель автоматически

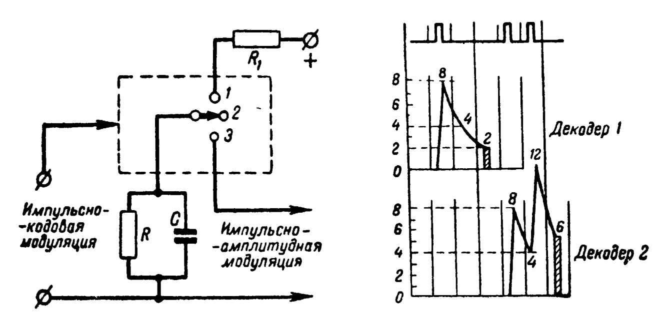


Рис. 66. Принцип декодирования.

переводится на короткий промежуток времени в положение 3 и выдает к демодулятору импульс высотой в 2 единицы.

Следующая группа импульсов (011) относится к соседнему каналу и имеет «цену» 2+4=6 единиц. Заряд конденсатора, полученный от одного импульса и снизившийся до 4 единиц, дополняется другим импульсом до 12 единиц и по окончании кодовой группы приобретает требуемое значение в 6 единиц. Здесь необходимо отметить следующее обстоятельство: момент снятия выходного импуль-

са оказывается вне интервала времени данной кодовой группы, т. е. заходит в интервал группы следующего канала. Для того чтобы импульсы соседних каналов не налагались друг на друга, в приемной аппаратуре имеется два декодирующих устройства (декодера); в один из них специальным коммутатором посылаются кодовые группы нечетных номеров каналов, а в другой — четных. Это отражено в графиках на рис. 66.

Заканчивая на этом сведения об импульсно-кодовой модуляции, подчеркиваем, что ее свойства особенно ценны для радиорелейных линий с большим числом ретрансляций. В каждом приемном устройстве такой линии производится регенерация формы импульсов. Благодаря этому не происходит накопления помех, т. е. с увеличением числа ретрансляций искажения не нарастают. При импульсно-фазовой модуляции накопление помех неизбежно. Однако сложность импульсно-кодовой аппаратуры ограничивает ее применение только теми случаями, когда использование других видов модуляции не отвечает поставленным требованиям.

Понятие об импульсно-разностной модуляции

Импульсно-разностная модуляция (ИРМ), как и импульсно-кодовая, осуществляет передачу квантованных значений при помощи импульсов калиброванной формы по принципу «есть импульс — нет импульса». Но квантуются и передаются импульсами не сами значения разговорного сигнала, а их приращения относительно предыдущих значений через калиброванные промежутки времени, т. е. разности этих значений. Отсюда — и название данного вида модуляции; в математике приращение обозначается буквой Δ (дельта), а потому применяется также термин «дельта-модуляция».

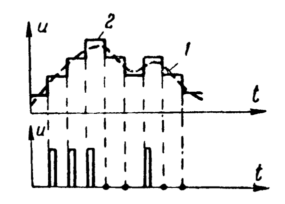


Рис. 67. Принцип импульсно-разностной модуляции.

Принцип модуляции заключается в следующем. Напряжение первичного телефонного сигнала сравнивается с вспомогательным напряжением, искусственно создаваемым в аппаратуре в виде ступенчатой функции, приближенно воспроизводящей форму сигнала (рис. 67). Длительность и высота ступеньки — величины постоянные. Сравнение осуществляется автоматически в специальном сравнивающем блоке (компараторе) и происходит периодически через промежутки времени, частота которых кратна тактовой частоте. Если к моменту окончания ступеньки напряжение сигнала (кривая *1*) превышает уровень ступеньки, т. е. имеется положительное приращение, то вспомогательное напряжение повышается скачком еще на одну ступень (кривая *2*). Положительному скачку вспомогательного напряжения сопутствует появление на выходе импульсного модулятора калиброванного импульса положительной полярности (нижний график). Этим импульсом управляется радиопередатчик.

Если же к моменту окончания ступеньки напряжение сигнала оказывается ниже ее, т. е. имеется отрицательное приращение, то вспомогательное напряжение падает скачком на одну ступень. Отрицательному скачку вспомогательного напряжения сопутствует

появление импульса отрицательной полярности, который не пропускается к радиопередатчику. Значит, радиопередатчик включается только положительными импульсами, т. е. сигнал оказывается кодированным по двоичной системе и представляет собой сочетание импульсов и пропусков (пауз). Можно сказать, что модулирующим параметром служит приращение напряжения сигнала, которое воспроизводится детектором приемника в виде такого же сочетания импульсов и пауз. Естественно, что излучаемые одинаковые импульсы допускают регенерацию своей формы в приемной аппаратуре.

Структурная схема передающего устройства показана на рис. 68. Здесь же развернуты эпюры напряжений на выходах отдельных блоков.

Генератор импульсов, сходный с описанными выше, дает последовательность калиброванных импульсов с равными интервалами.

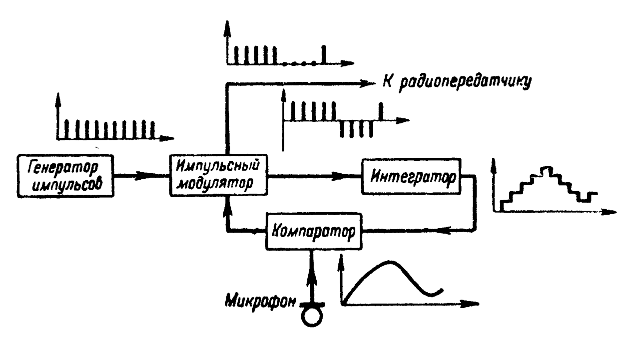


Рис. 68. Передающая аппаратура с дельта-модуляцией и эпюры напряжений для ее блоков.

Частота повторения импульсов — несколько десятков килогерц. Эти импульсы воздействуют на импульсный модулятор, получающий одновременно на второй вход управляющее напряжение с выхода компаратора. В зависимости от знака управляющего напряжения импульсы на выходе модулятора либо сохраняют, либо изменяют свою полярность. Положительные импульсы подаются к радиопередатчику и управляют его излучением, как указывалось выше. Но со второго выхода импульсного модулятора снимаются импульсы той и другой полярности на вход суммирующего блока, называемого интегратором. Последний представляет собой разновидность накопительной схемы, где каждый положительный импульс поднимает выходное напряжение на одну определенную ступень, а отрицательный снижает на такую же ступень. Получаемое на выходе интегратора вспомогательное ступенчатое напряжение воздействует вместе с первичным сигналом на компаратор, выходное напряжение которого получает тот или иной знак в зависимости от преобладания того или другого из сравниваемых напряжений в моменты сравнения. Знакопеременное напряжение на выходе компаратора управляет работой импульсного модулятора, как указано выше.

Таким образом, импульсный модулятор, интегрирующая и сравнивающая схемы образуют замкнутую цепь, с помощью которой

в передатчике формируется ступенчатое напряжение, приближенно отображающее форму первичного сигнала. Погрешность отображения уменьшается с увеличением числа ступенек.

Приемное устройство для сигналов с дельта-модуляцией имеет структуру, представленную на рис. 69, где развернуты также эпюры напряжений. Принимаемые и усиливаемые радиоимпульсы воздействуют на детектор вместе с помехами. Искаженные видеоимпульсы подвергаются ограничению и управляют импульсным модулятором того же типа, что и в передающем устройстве. Одновременно на модулятор воздействуют калиброванные местные импульсы с выхода генератора, работающего синхронно с генератором импульсов передатчика-корреспондента (система синхронизации на схеме не развернута).

Модулятор пропускает калиброванные импульсы без изменения полярности, если напряжение сигнала превышает уровень ограничения. Если же напряжение сигнала оказывается ниже уровня ограни-

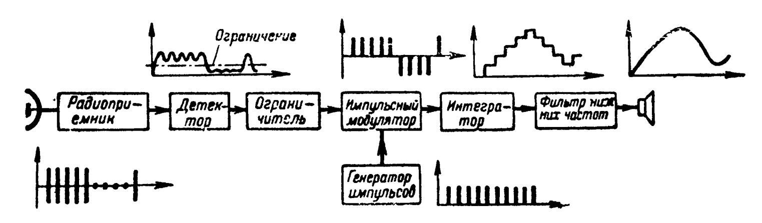


Рис. 69. Приемная аппаратура с дельта-модуляцией и эпюры напряжений для ее блоков.

чения (паузы), то калиброванные импульсы на выходе модулятора изменяют полярность. Именно в модуляторе происходит и регенерация формы импульсов.

В интеграторе, действие которого аналогично описанному выше, знакопеременные импульсы модулятора преобразуются в напряжение ступенчатой формы, приближенно отображающее передаваемый первичный сигнал. Фильтр нижних частот сглаживает пульсации (ступеньки) и восстанавливает первичный сигнал с искажениями, обусловленными квантизацией при ограниченном числе ступенек. Практически искажения проявляются в виде шума квантования, как и при ИКМ.

Следует отметить еще одну особенность дельта-модуляции: при высокой частоте (малом периоде) первичного сигнала ступенчатое напряжение за четверть периода сигнала не успевает нарастать до тех величин, каких оно достигает при низкой частоте сигнала. Значит, динамический диапазон (отношение максимальной амплитуды к минимальной) для высоких звуковых частот меньше, чем для низких. Практически такое искажение компенсируется свойствами речи и слуха.

Сравнивая импульсно-разностную модуляцию с импульсно-кодовой, следует сказать, что в обоих видах достижима высокая помехозащищенность. Но шум квантизации для ИКМ несколько ниже, чем для ИРМ при сравнимых частотах калиброванных импульсов. Зато аппаратура ИРМ более проста, чем ИКМ. Преиму-

ществом ИРМ является также то, что знакопеременные видеоимпульсы модулятора более удобны для усиления, нежели униполярные.

Для сопоставления сложности аппаратуры основных видов импульсной связи нередко называют следующие средние цифры, взятые из практики для 12-канальных радиорелейных станций: системы с импульсно-фазовой модуляцией имеют по 3 лампы на канал и 27 ламп в блоках, общих для всех каналов; системы с импульсно-разностной модуляцией имеют по 6 ламп на канал и 16 ламп в общих блоках.

Разумеется, в современной аппаратуре уплотнения лампы все больше и больше вытесняются полупроводниковыми приборами.

ГЛАВА ШЕСТАЯ

ХАРАКТЕРНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ РАДИОЧАСТОТНОЙ АППАРАТУРЫ

Антенные устройства

Для радиорелейных и тропосферных станций дециметровых и сантиметровых волн широкое применение нашли параболические антенны (см., например, рис. 12). Свое название такая антенна получила вследствие того, что ее зеркало представляет собой часть поверхности параболоида вращения. Лучи радиоволн, падающие на это зеркало из его фокуса, отражаются от металлической поверхности параллельным пучком (рис. 70). В фокусе параболоида помещается излучатель. При питании антенны с помощью коаксиального фидера излучателем служит диполь с диском в роли рефлектора (рис. 70,*а*); при питании с помощью волновода излучатель представляет собой открытый конец волновода (рис. 70,*б*) или щель в стенке волновода. Зеркало обычно выполняется из сплошного или перфорированного дюралюминия. Размеры зеркала при данной длине волны определяются требуемым коэффициентом усиления.

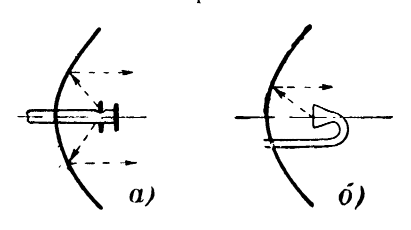


Рис. 70. Параболические антенны.

Параболическая антенна имеет следующие недостатки. Во-первых, с увеличением размеров коэффициент усиления возрастает медленнее, чем площадь зеркала, так как распределение поля на отражающей поверхности неравномерно. Во-вторых, поле, отражаемое от зеркала, воздействует на излучатель, нарушая его согласование с фидером в широкой полосе частот. Далее, приемная параболическая антенна недостаточно защищена от воздействия поля радиоволн, приходящих с обратного направления. Наконец, невыгодна «парусность» антенн больших размеров, требующая серьезных мер повышения ветроустойчивости.

В последние годы для радиорелейных станций чаще применяются рупорно-параболические антенны, в которых устранена часть недостатков, свойственных простым параболическим антеннам. Принцип действия и форма рупорно-параболической антенны даются на рис. 71. Зеркало этой антенны также представляет собой часть поверхности параболоида. Фокус его находится в горловине рупора, куда и подводится питание. Сам рупор служит экраном, направляющим лучи радиоволн на поверхность зеркала. Выходное отверстие антенны закрывается от атмосферных осадков пластиной из диэлектрика, пропускающего радиоволны.

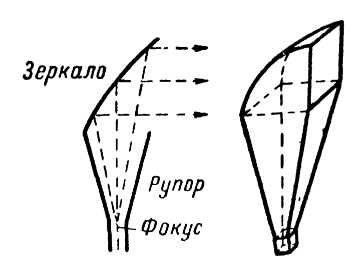


Рис. 71. Рупорно-параболическая антенна.

Показанное на рис. 71 направление лучей говорит об отсутствии влияния отраженных волн на излучатель. Конструкция антенны устраняет возможность приема с обратного направления. Значит, такая антенна более широкополосна и обладает бо́льшим защитным действием, нежели параболическая. На рис. 72 мы видим рупорно-параболические антенны на башне стационарной многоствольной радиорелейной станции.

В радиорелейных станциях находят применение также перископические антенны, которые были описаны в гл. 1. Другие типы антенн, имеющие более ограниченное применение, рассматривать в этом кратком обзоре мы не будем.

Радиопередатчики

В оконечных радиорелейных станциях, как уже указывалось, могут применяться передатчики с частотной и с амплитудной модуляцией. Частотная модуляция является единственным видом управления колебаниями при уплотнении линии по частоте и лишь в отдельных (сравнительно редких) сучаях используется при уплотнении по времени. Амплитудная модуляция характерна для линий с временны́м уплотнением. Рассмотрим кратко построение передающих устройств для каждого из этих видов модуляции.

Частотная модуляция в передатчиках может осуществляться непосредственно на сверхвысокой частоте (рис. 73,*а*). Многоканальное сообщение с выхода уплотняющей аппаратуры через групповой усилитель *ГУ* (см. также рис. 30 и 31) воздействует на автогенератор сверхвысокой частоты *АГ СВЧ*, производя его частотную модуляцию. Автогенератор выполняется, как правило, на отражательном клистроне. Частота автоколебаний изменяется путем изменений напряжения на отражательном электроде клистрона. Это — чрезвычайно простой метод частотной модуляции. В дециметровом диапазоне волн может применяться автогенератор на триоде, дополняемый обычным частотным модулятором. Генераторы на отражательных клистронах маломощны. Поэтому после автогенератора вклю-



Рис. 72. Радиорелейная станция с рупорно-параболическими антеннами.

чается усилитель мощности *УМ*, обеспечивающий получение в антенне нескольких ватт для обычных радиорелейных станций. Современным прибором для усиления мощности в диапазоне сантиметровых и наиболее коротких дециметровых волн служит лампа бегущей волны. На более длинных дециметровых волнах возможно применение металлокерамического триода.

Модуляция в отражательном клистроне не обеспечивает строгой пропорциональности между модулирующим напряжением и частотой автоколебаний. Такая нелинейность модуляции приводит к взаим-

ным помехам между каналами Поэтому описанная схема передатчика используется в радиорелейных линиях с небольшим числом каналов или для передачи одного канала телевидения.

В многоканальных магистральных линиях передатчики оконечных станций в большинстве случаев имеют частотную модуляцию по промежуточной частоте (рис. 73,*б*) с последующим преобразованием модулированной промежуточной частоты в сверхвысокую. Автогенератор промежуточной частоты (выбираемой в интервале от 30 до 100 *Мгц*) модулируется многоканальным сообщением. Колебания усиливаются и воздействуют на смеситель *С* одновременно с гетеродином сверхвысокой частоты *ГСВЧ*. Колебание разностной частоты (тоже сверхвысокой) выделяется фильтром *Ф* из всех других «продуктов» преобразования и после усиления мощности питает антенну.

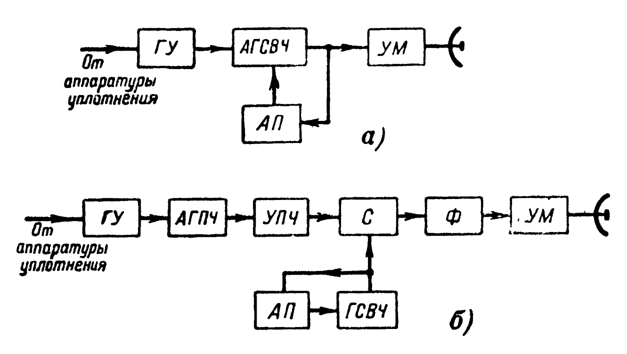


Рис. 73. Структурные схемы радиопередатчиков с частотной модуляцией.

ГУ—групповой усилитель; *АГСВЧ*—автогенератор сверхвысокой частоты; *УМ*—усилитель мощности; *АП*—автоподстройка; *АГПЧ*—автогенератор промежуточной частоты; *УПЧ*—усилитель промежуточной частоты; *С*—смеситель; *Ф*—фильтр; *ГСВЧ*—гетеродин сверхвысокой частоты.

При возрастающих требованиях к стабильности частоты передатчиков радиорелейных станций оказываются необходимыми меры стабилизации средней (несущей) частоты. В схемах с частотной модуляцией (рис. 73) указаны в качестве мер стабилизации частоты блоки автоподстройки *АП*, в которых в качестве эталонов частоты могут служить объемные резонаторы высокой добротности.

Еще более выгодным эталоном частоты мог бы быть современный кварцевый резонатор, обладающий очень высокой добротностью. Но его применение встречается с двумя трудностями. Во-первых, кварцевый резонатор, имеющий собственную сверхвысокую частоту, невыполним, а осуществимая кварцевая пластина с собственной частотой примерно в 10 *Мгц* требует последующего умножения частоты. Во-вторых, подобный эталон может служить лишь для стабилизации гетеродина, не подвергающегося частотной модуляции (см., например, рис. 73,*б*).

Частотная модуляция колебаний, стабилизированных с помощью кварца, достижима только косвенными методами. Заслуживает упо-

минания один из таких методов, получивший в нашей литературе название «импульсно-частотное возбуждение», а в иностранной — «серрасоидная модуляция». Основные блоки подобного передатчика изображены на рис. 74. Генератор синусоидальных колебаний *ГСК*, стабилизированный кварцем *Кв* (имеющим в одном из реальных типов аппаратуры частоту 2 *Мгц*), воздействует на формирующее устройство *ФУ*, которое выдает пилообразное напряжение той же частоты. Далее следует основной блок системы — импульсный модулятор *ИМ*. Под одновременным воздействием пилообразных импульсов и модулирующего напряжения группового сигнала (групповой усилитель *ГУ*) модулятор выдает импульсы, модулируемые по фазовой позиции. Принцип и процессы импульсно-фазовой модуляции сходны с описанными выше (рис. 59).

В резонансном ограничителе-умножителе *О-У* выделяется одна из высших гармоник кварца, сохраняющая при себе боковые частоты модуляции, как было пояснено, например, на рис. 40. Следова-

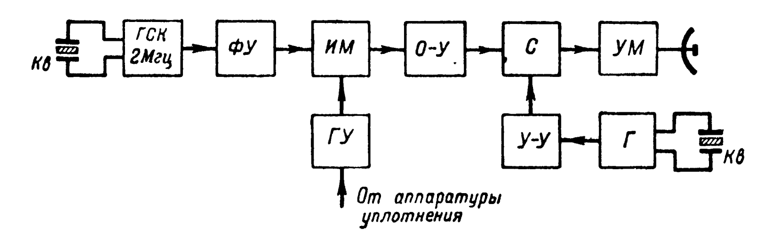


Рис. 74. Передатчик частотной модуляции с кварцевым возбудителем.
Кв—кварц; *ГСК*—генератор синусоидальных колебаний; *ФУ*—формирующее устройство; *ИМ*—импульсный модулятор; *ГУ*—групповой усилитель; *О-У*—ограничитель-умножитель; *С*—смеситель; *У-У*—усилитель-умножитель; *УМ*—усилитель мощности; *Г*—гетеродин.

тельно, из модулированных импульсов выделилось синусоидальное колебание с той же модуляцией. Но требуется получить не фазовую, а частотную модуляцию. Отличие частотной модуляции от фазовой состоит в следующем: фазовый модулятор дает отклонение несущей частоты, пропорциональное не только величине, но и частоте модулирующего напряжения, а при частотной модуляции отклонение должно быть независимым от частоты модулирующего напряжения. Последнее требование обеспечивается специальной формой частотной характеристики группового усилителя, которая подбирается так, чтобы усиление было обратно пропорциональным модулирующей частоте.

Для того чтобы уменьшить число ступеней умножения при доведении частоты возбудителя до сверхвысокого порядка, возможно применить преобразователь частоты, в котором смеситель *С* гетеродинируется немодулированным колебанием второго кварцевого генератора. Частота этого гетеродина *Г* после умножения (усилитель-умножитель *У-У*) лежит в диапазоне ультракоротких волн. Вслед за смесителем также возможно включение умножителей. Блоки передатчика завершаются усилителем мощности *УМ*, питающим антенну.

Серрасоидная модуляция нашла себе применение, в частности, в передатчиках одной из систем тропосферной связи, описанной

в 1955 г. за рубежом. Следует указать, что для передатчиков тропосферной связи достигнутые мощности ламп бегущей волны недостаточны. Поэтому каскады мощного усиления выполняются для них на многорезонаторных пролетных клистронах. Пример трехрезо-

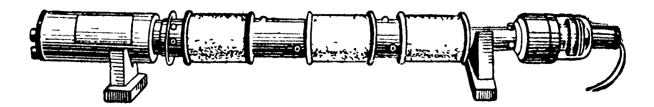


Рис. 75. Трехрезонаторный пролетный клистрон.

наторного клистрона на мощность 10 *квт* приведен на рис. 75. Такие лампы работают с искусственным охлаждением.

Как указывалось выше, задача стабилизации частоты становится особенно важной в передатчиках тропосферной связи, если в них

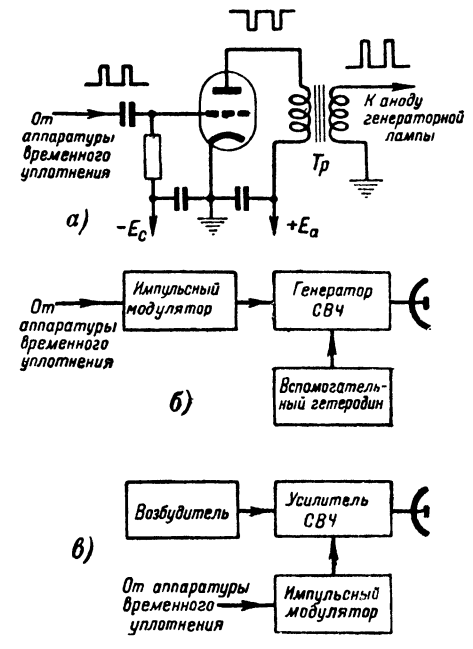


Рис. 76. Схема и способы включения импульсного модулятора.

вместо частотной модуляции будет применяться однополосная модуляция сверхвысокой частоты.

Теперь обратимся к передающим устройствам станций импульсной связи (т. е. связи с уплотнением по времени), в которых радиочастотная модуляция производится по амплитуде. Одна из схем им-

пульсного модулятора и два возможных способа его соединения с передатчиком даются на рис. 76.

Импульсный модулятор представляет собой каскад видеоусиления с трансформатором (рис. 76,*а*). Триод заперт отрицательным смещением и отпирается импульсами положительной полярности, подводимыми с выхода уплотняющей аппаратуры. Заметим, что в станциях импульсной связи уплотняющая аппаратура размещается вместе с радиочастотной, так как передача импульсов по обычному кабелю без больших искажений невозможна. В первичной обмотке трансформатора возникают импульсы отрицательной полярности, а во вторичной — положительные. Они подаются на анод генераторного триода, и последний генерирует радиоимпульсы этой же длительности.

Если передатчик является однокаскадным, т. е. модуляции подвергается автогенератор, то подача положительного импульса на анод обеспечивает лишь возможность самовозбуждения. Электрическим толчком, возбуждающим начало автоколебаний, является флуктуационное напряжение, создаваемое хаотическим движением электронов в цепях автогенератора. Случайный характер таких толчков приводит к изменениям положения переднего фронта радиоимпульсов, что, как мы знаем, влечет за собой увеличение шума в каналах принимающей установки. Для устранения таких шумов автогенератор подвергается дополнительному воздействию со стороны вспомогательного гетеродина малой мощности (рис. 76,*б*). Этот гетеродин-«катализатор» своим напряжением обеспечивает толчки для начала автоколебаний, устраняя случайность моментов возникновения передних фронтов радиоимпульсов.

Для повышения стабильности частоты передатчика возможно применение в нем двух каскадов: возбудителя и усилителя мощности *СВЧ* (рис. 76,*в*). В таком случае модуляция производится на анод усилительной лампы и вспомогательный гетеродин не требуется.

Таковы наиболее характерные элементы передающих устройств радиорелейных станций.

Радиоприемники

В станциях радиорелейной связи применяются супергетеродинные приемники с однократным, а иногда и с двукратным преобразованием частоты. Схемы приемников для частотно-модулированных и для импульсных сигналов различаются в основном лишь способами детектирования и оконечного усиления. На рис. 77,*а* мы видим структурную схему приемника частотно-модулированных сигналов для радиолиний с уплотнением по частоте. Характерными элементами приемника являются амплитудный ограничитель *О* колебаний промежуточной частоты и частотный детектор *ЧД* (дискриминатор), а также выходной усилитель группового сигнала *ГУ* (групповой усилитель).

На рис. 77,*б* дана структура приемника амплитудно-модулированных сигналов для радиолиний с уплотнением по времени. Его характерными элементами являются амплитудный детектор *Д* с последующим двусторонним ограничителем *О* и усилителем видеоимпульсов *ВУ*.

В обоих приведенных типах приемников, как нам уже известно, путем ограничения достигается повышенная защищенность от помех

благодаря подавлению шумовой модуляции по амплитуде. Но для успешной работы ограничителя требуется обеспечить превосходство амплитуды сигнала над вероятным уровнем напряжения помех. Необходимым средством уменьшения внешних помех служит входной полосовой фильтр, выполняемый на коаксиальных или полых резонаторах, либо на отрезках волноводов и ограничивающий полосу пропускания. Основным источником внутренних шумов приемника является преобразователь частоты. Поэтому весьма желательно осуществить усиление сигнала на сверхвысокой частоте до преобразо-

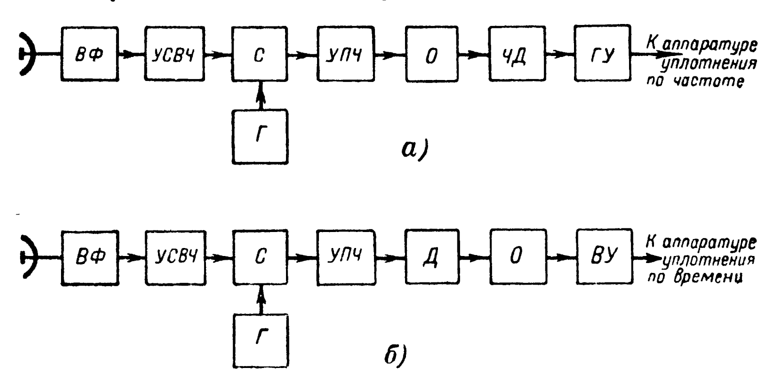


Рис. 77. Структурные схемы приемников.

а — для ЧМ, *б* — для АМ. *ВФ* — входной фильтр; *УСВЧ* — усилитель сверхвысокой частоты; *С* — смеситель; *Г* — гетеродин; *УПЧ* — усилитель промежуточной частоты; *О* — ограничитель; *ЧД* — частотный детектор, *ГУ* — групповой усилитель; *Д* — детектор; *ВУ* — видеоусилитель.

вателя. Усилитель должен обладать низким уровнем собственных шумов.

Одним из электронных приборов, обеспечивающих усиление с малыми шумами, является лампа бегущей волны «входного» типа. Но еще больший интерес в этой области привлекают к себе так называемые параметрические усилители.

Параметрическое усиление сигнала поясняется на рис. 78. Сигнал, имеющий частоту f_s, действуя во входной цепи приемника, наводит в катушке L колебательного контура усилителя электродвижущую силу. Контур имеет три ветви: индуктивную L, активную $R_р$ (где учтены все виды активных сопротивлений контура) и емкостную — в виде конденсатора с подвижной верхней пластиной. Если эту пластину периодически поднимать и опускать, то емкость будет изменяться около среднего значения C на $\pm\Delta C$.

Пусть в какой-то момент конденсатор имел заряд q при напряжении между пластинами u_C, а подвижная пластина находилась в нижнем положении. Переместив мгновенно эту пластину вверх, мы тем самым уменьшим емкость. Так как заряд конденсатора при этом не изменится, напряжение на конденсаторе должно повыситься в соответствии с соотношением $q=Cu_C$. Запас энергии в конденсаторе мгновенно возрастет во столько раз, во сколько уменьшится его емкость. Именно такое добавление энергии и составляет основу

параметрического усиления, т. е. усиления, основанного на изменении параметра контура (в данном случае — емкости) под воздействием внешней силы.

Источником добавляемой энергии в данной условной схеме служит механическая работа внешней силы, перемещающей пластину вверх против сил взаимного притяжения пластин, заряженных разноименно. Для того чтобы повторить эту операцию, требуется снова сблизить пластины. Мы не потеряем полученную ранее энергию, если сблизим пластины в момент отсутствия заряда, т. е. при перемене знака напряжения.

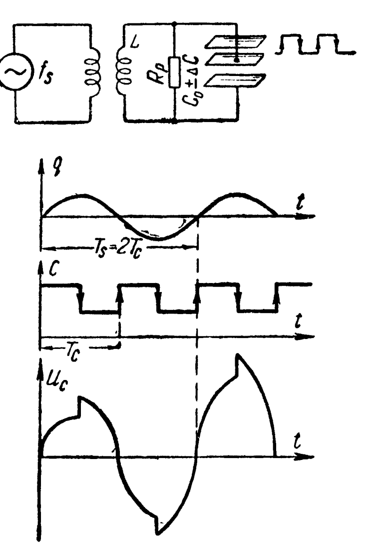


Рис. 78. Условная схема параметрического усилителя и графики его работы.

На верхнем графике (рис. 78) показан заряд конденсатора, который создавался бы сигналом при неизменной емкости контура. Средний график изображает изменения емкости при механических перемещениях пластины вверх и вниз. Моменты уменьшения емкости соответствуют амплитудам заряда конденсатора, а моменты увеличения — переходам через нулевую фазу. Значит, емкость нужно изменять вдвое быстрее частоты сигнала; за один период сигнала должно совершаться два периода изменения емкости ($f_C = 2f_s$). На нижнем графике показано напряжение u_C на конденсаторе, возрастающее скачками в моменты уменьшения емкости. График свидетельствует о периодическом пополнении энергии колебаний, т. е. об усилении сигнала.

В реальном параметрическом усилителе емкость изменяется, конечно, не механическим, а электрическим воздействием. Такое воздействие оказывает гетеродин, вводимый в состав усилителя и имеющий колебания удвоенной частоты по сравнению с частотой сигнала. Этот гетеродин называют «генератором накачки» энергии.

В роли изменяемой емкости используется полупроводниковый диод специальной конструкции (рис. 79,*а*). Эквивалентная схема диода содержит параллельное соединение «постоянной» емкости $C_{пост}$ и «переменной» $C_{пер}$, а также последовательное активное сопротивление R полупроводника [1] (рис. 79,*б*). В конденсаторе этого типа емкость электронно-дырочного перехода изменяется в 2—3 раза при воздействии напряжения накачки с амплитудой примерно 0,5—1 *в* (рис. 79,*в*). На очень коротких волнах (короче 0,5 *см*) основная часть напряжения падает на сопротивлении R, вследствие чего эффект параметрического усиления резко падает.

[1] Рид И. Параметрический усилитель с переменной емкостью, «Зарубежная радиоэлектроника», № 1 1960 г.

Генератором накачки служит клистронный гетеродин с мощностью меньше 0,5 *вт*. Принципиально возможно параметрическое усиление и путем изменения индуктивности L, но при этом требуется значительно бо́льшая мощность накачки.

Конструктивно контур усилителя может представлять собой полый резонатор, внутри которого размещается диод. Колебания сигнала и накачки вводятся в резонатор по коаксиальным или волноводным соединениям. Усиленный сигнал может отводиться из резонатора отдельным путем или же по общему фидеру с принимаемым колебанием, с последующим разделением их в циркуляторе [1].

Практически очень трудно поддерживать точно указанные выше частотные (и, следовательно, фазовые) соотношения между сигналом и накачкой. Нарушение этих соотношений снижает эффект усиления. Приходится усложнять состав усилителя, связывая с рассмотренным контуром еще один контур и получая схему, выполняющую автоматически условия максимальной передачи энергии накачки. Не останавливаясь на такой двухконтурной схеме, отметим, что параметрический усилитель привлекает к себе наибольший интерес малым уровнем собственных шумов. Дело в том, что основным источником шумов является только небольшое сопротивление R диода; его шумовой эффект может быть уменьшен путем охлаждения диода.

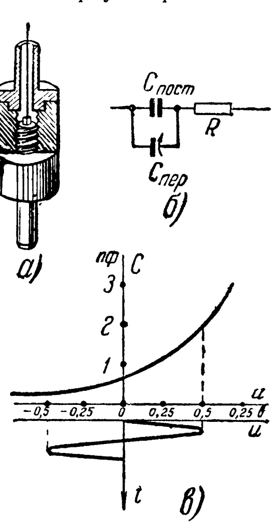


Рис. 79. Конструкция и свойства диода в параметрическом усилителе.

Квантовомеханические усилители, о которых упоминалось в гл. 1, способны обеспечить уровень шумов ниже, чем параметрические. Однако антенны радиорелейных линий, направляемые горизонтально, подвергаются столь значительному шумовому воздействию толстого слоя атмосферы, что применение более дорогих квантовомеханических усилителей с весьма малыми собственными шумами оказывается нецелесообразным. Поэтому для радиорелейных, в том числе и тропосферных станций перспективны именно параметрические усилители.

Помимо перечисленных выше элементов приемных устройств радиорелейных станций, известным своеобразием отличаются и остальные их блоки, в том числе преобразователи частоты и усилительные каскады. Однако это своеобразие относится не к принципам работы, а к выполнению технических требований, и потому на них нет необходимости останавливаться.

---

[1] Циркулятор представляет собой волноводное устройство, способное разделить по поляризации и направить к разным выходам прямую и обратную волны. Необходимая разница в поляризации обеих волн достигается при их прохождении через намагниченный ферритовый стержень, располагаемый внутри волновода.

ГЛАВА СЕДЬМАЯ

О СПОСОБАХ РЕТРАНСЛЯЦИИ

Промежуточные станции для линий, уплотняемых по частоте

Промежуточная станция в отличие от оконечной должна иметь в своем составе два передатчика и два приемника, чтобы ретранслировать сигналы в обоих направлениях (рис. 2). Следовательно, промежуточную станцию можно составить из двух комплектов аппаратуры оконечной станции. В радиорелейных линиях подвижного типа так и поступают, учитывая, что каждая станция может оказаться либо оконечной, либо промежуточной. Подобным же образом строятся главные станции стационарного типа.

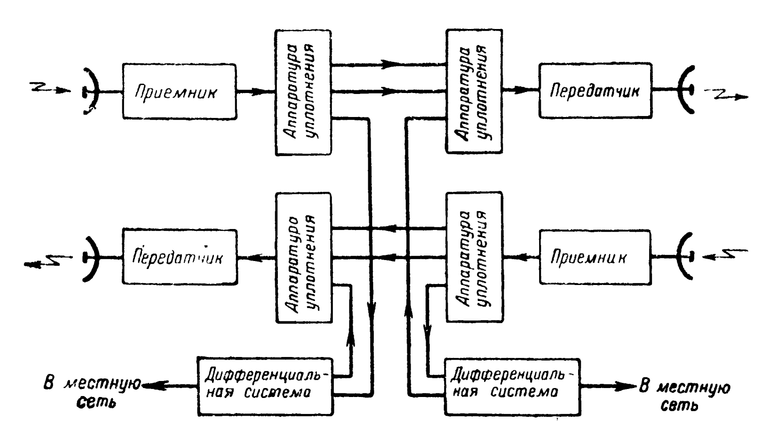


Рис. 80. Структура промежуточной станции с полной демодуляцией и повторной модуляцией и с возможностью выделения любого канала.

Наличие на промежуточной станции двух полных комплектов оконечной, в том числе и уплотняющей, аппаратуры, позволяет выделять любые каналы с одного и другого направлений в местную телефонную сеть и производить «сквозную» ретрансляцию каналов, не выделяемых в местную сеть (рис. 80). На такой станции сигнал подвергается детектированию в приемнике и демодуляции в канале, т. е. доводится до разговорной частоты, а затем ретранслируемый сигнал подвергается первичной (однополосной) модуляции в канале и вторичной (частотной) модуляции в передатчике. Иногда такой процесс называют ретрансляцией «по низкой частоте». Это вызывается необходимостью обеспечить возможность выделения любого канала в местную сеть и осуществлять слуховой контроль каналов на главной станции. Однако демодуляция и повторная модуляция сигнала всегда сопровождается его искажениями. Поэтому на большинстве промежуточных станций (где нет нужды выделять каналы, за исключением только служебного) аппаратура уплотнения исключает-

ся, а ретрансляция производится без детектирования и демодуляции сигналов. Тем самым станция удешевляется, а качество ретранслируемых сигналов повышается. Если на промежуточной станции нет выделения каналов, то радиоаппаратура для одного направления передачи не имеет общих блоков с радиоаппаратурой другого направления, а потому можно ограничиться изображением структурных схем лишь для одного направления.

В схемном отношении простейшим видом ретрансляции можно считать ретрансляцию с усилением только на сверхвысоких частотах (рис. 81). Сигнал слева принимается на частоте f_1, подвергается усилению с помощью лампы бегущей волны «входного» типа, имеющей малый уровень собственных шумов, и поступает в преобразователь частоты. Местный гетеродин имеет такую частоту $f_г$, которая, суммируясь с частотой f_1 или вычитаясь из нее, дает частоту f_2, нужную для переизлучения сигнала (также сверхвысокую). Колебания на частоте f_2 проходят через фильтр, пропускаю-

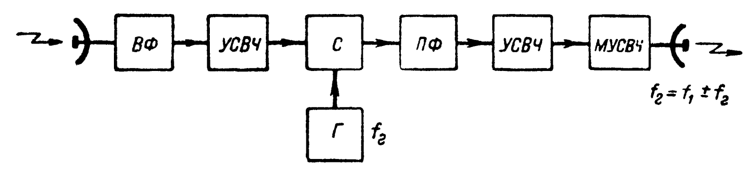


Рис. 81. Структура промежуточной станции с усилением на СВЧ.
ВФ—входной фильтр; *УСВЧ*—усилитель сверхвысокой частоты; *С*—смеситель; *Г*—гетеродин; *ПФ*—полосовой фильтр; *МУСВЧ*—мощный усилитель сверхвысокой частоты.

щий спектр боковых частот модуляции, и усиливаются в двух каскадах на лампах бегущей волны, причем второй каскад обеспечивает требуемую мощность излучения. Необходимость преобразования (сдвига) сверхвысокой частоты очевидна: излучение на принимаемой частоте f_1 создало бы обратное воздействие на вход приемника, которое явилось бы причиной самовозбуждения системы.

Стабилизация частоты гетеродина не представляет собой сложной задачи, если абсолютная величина разности $f_1—f_2$ значительно ниже величин f_1 и f_2. Но лампы бегущей волны трех указанных типов являются достаточно сложными приборами, и их разработка в соответствии с требованиями релейной связи составляет еще и сейчас главную трудность в реализации промежуточной аппаратуры с усилением на сверхвысоких частотах.

Выбор электронных приборов оказывается более простым, если основное усиление осуществлять на промежуточной частоте. Элементарный пример структуры промежуточной станции с усилением на промежуточной частоте изображен на рис. 82,*а*. Подобные ретрансляторы уже применялись в те годы, когда еще не были разработаны малошумящие усилители принимаемых сигналов СВЧ, и потому в схеме такой усилитель не показан.

Принимаемый сигнал, имеющий частоту f_1, после входного полосового фильтра подвергается преобразованию и усиливается на значительно более низкой промежуточной частоте $f_{пр}=f_1—f_{г1}$. После достижения достаточной амплитуды колебания промежуточной частоты проходят через ограничитель, устраняющий паразитную ампли-

тудную модуляцию. Далее колебания усиливаются дополнительно и преобразуются во втором смесителе при воздействии гетеродина с частотой $f_{г2}=f_{г1}+\Delta f$, где Δf — требуемый сдвиг частоты передачи относительно частоты приема. Колебание суммарной частоты $f_2=f_{г2}+f_{пр}=f_{г2}+f_1-f_{г1}=f_1+\Delta f$ после усиления нужной полосы частот в мощном каскаде питает антенну.

Основной недостаток данной схемы заключается в высоких требованиях к стабильности двух сверхвысокочастотных гетеродинов. Действительно, из соотношения $f_2=f_1+(f_{г2}-f_{г1})$ мы видим, что нестабильность частоты излучения зависит не только от нестабильности частоты приема, но и от нестабильности частот обоих гетеродинов.

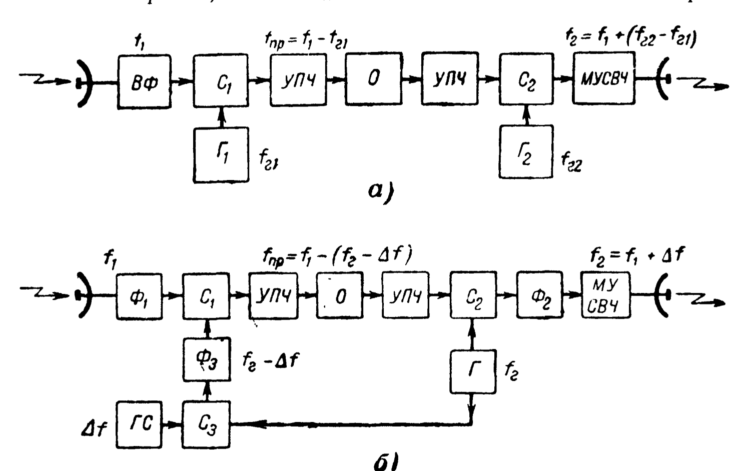


Рис. 82. Структура ретрансляционных станций с усилением на промежуточной частоте.

а — с двумя гетеродинами СВЧ; *б* — с одним гетеродином СВЧ. *ВФ* — входной фильтр; *С* — смеситель; *Г* — гетеродин; *УПЧ* — усилитель промежуточной частоты; *О* — ограничитель; *МУСВЧ* — мощный усилитель сверхвысокой частоты *Ф* — фильтр; *ГС* — гетеродин сдвига.

нов. Точнее говоря, желательно стабилизировать разность частот гетеродинов. Стабильность может быть повышена применением автоматических подстроек.

Более совершенным оказывается такое построение ретрансляции, при котором схема содержит только один сверхвысокочастотный гетеродин (рис. 82,*б*). Состав основного тракта сигнала в этой схеме сходен с составом предыдущей схемы, и процессы преобразования частот в основном тракте те же. Отличие состоит в том, что гетеродинирующее колебание для первого смесителя образуется не отдельным гетеродином, а третьим смесителем. На него воздействуют совместно колебания основного гетеродина СВЧ и гетеродина сдвига, имеющего частоту Δf. Фильтр $Ф_3$ выделяет колебание разностной частоты $f_г-\Delta f$, действие которого аналогично действию первого гетеродина предыдущей схемы. Задача стабилизации пониженной частоты сдвига представляет меньшую трудность. Что же касается

гетеродина СВЧ, то его колебания дважды участвуют в процессах преобразования частоты, а потому его нестабильность не сказывается на выходной частоте ретранслятора.

Имеется еще один вариант построения промежуточной станции, к которому прибегают в случае необходимости выделить только определенную небольшую часть каналов радиолинии, уплотненной по частоте. Специальная аппаратура выделения каналов входит в состав промежуточной станции и должна подключаться к обоим направлениям ретрансляции. Но основная часть каналов, не предназначенная для выделения, не подвергается демодуляции. Иначе говоря, ретрансляция этих каналов происходит с усилением их группового тракта и с повторной модуляцией только по радиочастоте. Состав такой станции дается на рис. 83.

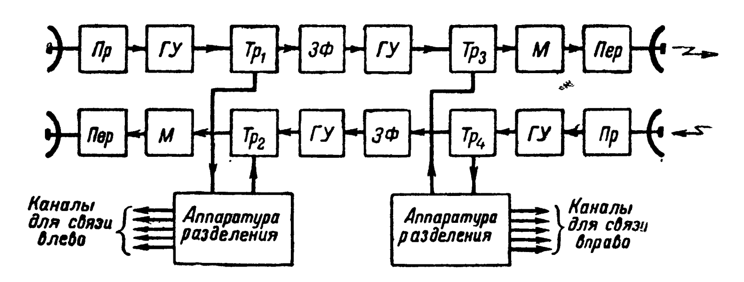


Рис. 83. Структура промежуточной станции с усилением группового спектра и с выделением части каналов.

Пр — приемник; *ГУ* — групповой усилитель; *Тр* — дифференциальный трансформатор; *ЗФ* — заградительный фильтр, *М* — модулятор; *Пер* — передатчик.

Сигналы, приходящие слева, в приемнике детектируются, и спектр всех каналов усиливается в групповом усилителе. На его выходе включен дифференциальный трансформатор $Тр_1$, соединяющий общий групповой тракт с заградительным фильтром и с аппаратурой выделения части каналов. Заградительный фильтр не пропускает колебаний в полосе частот выделяемых каналов, тогда как колебания полосы частот ретранслируемых каналов проходят через дополнительный усилитель к модулятору передатчика, излучающего сигналы вправо.

Колебания выделяемых каналов с помощью индивидуальных преобразователей аппаратуры разделения демодулируются в разговорные токи, которые питают телефоны абонентов левого направления связи. Разговорные токи от микрофонов тех же абонентов после индивидуального преобразования занимают полосу выделяемых каналов и вводятся в общий групповой спектр сигналов, приходящих справа, через дифференциальный трансформатор $Тр_2$. Таким образом, в модуляции левого передатчика участвуют и ретранслируемые, и вводимые сигналы.

Аналогично выделяются каналы тех же номеров из спектра сигналов, приходящих справа, а в освобождающуюся полосу спектра модуляции правого передатчика вводятся местные каналы для правого направления связи.

Промежуточные станции для линий, уплотняемых по времени

Подавляющее большинство существующих типов импульсных радиорелейных станций по составу аппаратуры не разделяются на оконечные и промежуточные. Если в составе станции имеется два комплекта приемно-передающей и уплотняющей аппаратуры, то такая станция может служить в роли промежуточной с доведением сигналов во всех каналах до разговорных токов и с выделением любой части каналов в местную сеть. Построение аппаратуры в этом случае полностью совпадает с указанным выше на рис. 80. Такое использование аппаратуры практикуется на главных (узловых) промежуточных станциях, но для линейных промежуточных станций оно невыгодно: демодуляция и повторная модуляция видеоимпульсов приводят к искажениям сообщения.

Вместе с тем для импульсных систем, имеющих радиочастотную модуляцию по амплитуде, нецелесообразно применение ретрансляций с усилением только на сверхвысоких или промежуточных частотах (ретрансляций гетеродинного типа), которые были показаны для систем с частотным уплотнением (рис. 81 и 82). Это объясняется следующими соображениями: при частотной модуляции радиопередатчика повышение помехоустойчивости достигалось включением ограничителя в тракт промежуточной частоты, до детектора; значит, эта мера оказывалась применимой в гетеродинных ретрансляциях. Вместе с тем нелинейность группового тракта, приводящая к взаимным помехам между каналами, делает нежелательной ретрансляцию с усилением в групповом тракте (подобно указанной на рис. 83). При амплитудной же модуляции импульсного радиопередатчика ретрансляция гетеродинного типа не дает возможностей повысить помехозащищенность, тогда как при ретрансляции с усилением видеоимпульсов мы не только не встретимся с искажающим влиянием нелинейности характеристик видеотракта, но и сможем применить меры восстановления искаженной формы видеоимпульсов, чем снизим нарастание помех вдоль линии.

Поэтому для импульсных линий с амплитудной радиочастотной модуляцией целесообразно применять промежуточные станции в режиме ретрансляций с доведением сигналов до видеотракта. Если при этом имеется необходимость ответвления части каналов, то такая задача решается проще, нежели при частотном уплотнении.

В связи с тем что структура радиопередатчиков и радиоприемников для подобной промежуточной станции не отличается от указанных на рис. 76,*б* и *в* и на рис. 77,*б*, мы ограничимся рассмотрением только аппаратуры выделения части каналов и лишь для одного направления связи (рис. 84).

На пути от выхода радиоприемника к модулятору радиопередатчика включены блок запирания импульсов выделяемых каналов и коллектор введения новых импульсов на «освободившиеся» места общей временно́й последовательности импульсов. Принцип работы блока запирания весьма несложен: блок представляет собой каскад видеоусиления, на вход которого воздействует последовательность всех принимаемых импульсов, но в промежутки времени действия импульсов выделяемых каналов на тот же каскад воздействуют селекторные импульсы в обратной полярности, запирающие каскад на эти промежутки времени.

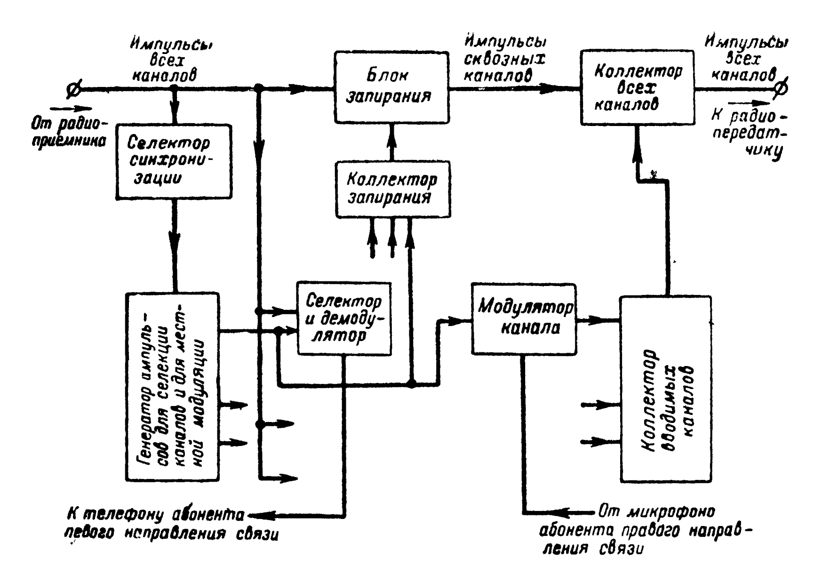


Рис. 84. Состав аппаратуры выделения каналов при ретрансляции с усилением видеоимпульсов.

Остальные элементы схемы уже описаны выше (см., например, рис. 44, 50, 51, 54, 55). Импульсы синхронизации, выделяемые своим селектором, преобразуются с помощью линии задержки в импульсы, выполняющие селекцию выделяемых каналов и предназначенные для модуляции разговорными токами вводимых каналов, а также для воздействия на блок запирания через коллектор запирания, в котором изменяется их полярность. Модулированные импульсы вводимых каналов собираются своим коллектором, от которого поступают в общую последовательность для модуляции радиопередатчика. Устройство блока запирания импульсов проще, нежели устройство заградительного фильтра в схеме на рис. 83, и это составляет преимущество системы уплотнения по времени.

ГЛАВА ВОСЬМАЯ

ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ И ВОПРОСЫ НАДЕЖНОСТИ РАДИОРЕЛЕЙНЫХ ЛИНИЙ

Отечественные радиорелейные линии

В Советском Союзе радиорелейные линии находят все расширяющееся применение в общегосударственной сети связи — магистральной и внутриобластной.

Магистральная радиорелейная сеть связи развивается совместно с кабельной сетью, причем эти виды связи рационально взаимодействуют и дополняют друг друга. Естественно, что для многоканаль-

ного уплотнения и для успешного соединения с кабельными линиями радиорелейные линии магистральной связи имеют частотное уплотнение. Основные научные идеи частотного уплотнения линий разработаны советскими специалистами, среди трудов которых видное место принадлежит трудам С. В. Бородича.

Для линий большой протяженности и с большой пропускной способностью применяется система Р-600, работающая на волнах сантиметрового диапазона. Она имеет шесть сверхвысокочастотных стволов, каждый из которых способен пропускать 600 телефонных каналов или телевизионную программу со звуковым сопровождением. Часть стволов обычно является резервной, однако и при этом условии пропускная способность линии очень велика. Следует напомнить, что каждый телефонный канал может пропустить до 24 телеграфных каналов, и такое использование телефонных каналов, называемое их вторичным уплотнением, практикуется очень широко.

Промежуточные станции системы Р-600 построены по принципу гетеродинной ретрансляции с усилителями на лампах бегущей волны. Эти станции работают без обслуживающего персонала и управляются электрическими командами по каналу телеуправления с главных станций.

Антенные системы станции Р-600—рупорно-параболические; они размещаются на верхней площадке круглой башни, внутри которой монтируется аппаратура.

Аппаратура телефонного уплотнения оконечных станций, а также аппаратура вторичного телеграфного уплотнения в комплекты станций не входит. Она размещается обычно в зданиях предприятий связи и по мере надобности обслуживает кабельные, радиорелейные и другие линии связи.

Для магистральных и внутриобластных линий средней пропускной способности имеется радиорелейная система Р-60/120. Она же может служить для ответвления каналов, выделяемых на узловой станции линии Р-600. Система Р-60/120 передает сигналы на волнах дециметрового диапазона. Она имеет три сверхвысокочастотных ствола, каждый из которых может пропускать до 120 телефонных каналов при частотном уплотнении или же телевизионную программу. Следует отметить, что отечественные радиорелейные линии выполняют основную роль в обмене телевизионными программами между городами и между странами. Промежуточные станции системы Р-60/120 выполнены по гетеродинной схеме ретрансляции с усилением на промежуточной частоте. Эти станции работают без обслуживающего персонала.

Антенны могут применяться либо перископического типа, либо параболические, с питанием через коаксиальный фидер. Аппаратура уплотнения — типовая, предназначенная для работы и по кабельным линиям.

Внутриобластные связи, а также связи, обслуживающие железные дороги, нефтепроводы, газопроводы и другие объекты народного хозяйства, нередко осуществляются по радиорелейным линиям. Число телефонных каналов таких линий невелико (единицы или десятки). Среди систем с небольшим числом каналов имеются системы с уплотнением по времени. Ведущая роль в разработке принципов уплотнения по времени принадлежит в нашей стране

ряду научных работников, среди трудов которых видное место занимают труды Ф. П. Липсмана.

Распространенным видом модуляции импульсов в радиорелейных системах не очень большой протяженности, уплотняемых по времени, оказывается импульсно-фазовая модуляция. Аппаратура получается компактной и сравнительно несложной, а правильность электрических процессов в различных звеньях этой аппаратуры наглядно контролируется с помощью осциллографа. Об эксплуатационном недостатке радиорелейных станций с временным уплотнением говорилось выше: без демодуляции и разделения каналов они не сопрягаются с кабельными линиями. Этот недостаток несуществен для специализированных линий, но он осложняет сопряжение в сетях связи страны. Телевизионные программы по линиям, предназначенным для уплотнения по времени, не передаются.

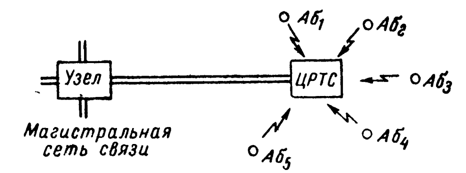


Рис. 85. Центральная радиотелефонная станция с селекцией абонентов по времени.

Известный интерес представляет возможность выполнения импульсной центральной радиотелефонной станции, обеспечивающей выход периферийных объектов на магистральную сеть связи (рис. 85). Одна из возможных реализаций этой задачи, описанная во французской литературе, в общих чертах такова. Центральная радиотелефонная станция (ЦРТС) содержит комплект радиорелейной аппаратуры с уплотнением по времени и две антенны — передающую и приемную, имеющие круговые диаграммы, ненаправленные в горизонтальной плоскости. Для связи со всеми абонентами используется только две волны — передачи и приема. Разделение абонентов осуществляется по времени.

ЦРТС устанавливается по возможности на возвышенной точке местности. За тактовый период в 125 *мксек* излучается импульс синхронизации и импульсы каналов, число которых равно числу периферийных абонентов. Каждый импульс тактового периода модулируется разговорным током «напарника» абонента через сеть связи. Абонентские станции имеют антенны, направленные в сторону ЦРТС. Они принимают всю последовательность импульсов, излучаемых ЦРТС. С помощью селектора синхронизирующего импульса каждая станция осуществляет выделение импульса своего канала и формирование ответного импульса точно тем же способом, который изложен выше для выделения каналов на промежуточной станции (рис. 84). Ответный импульс модулируется разговорным током абонента и излучается передатчиком. Приемник ЦРТС является как бы коллектором ответных радиоимпульсов, вновь образуя из них полную последовательность. Выход ЦРТС на узел связи может быть дан либо по кабелю, либо по радиорелейной линии. В первом случае в уплотняющей аппаратуре ЦРТС производится модуляция и

демодуляция импульсов. Во втором же случае обмен между ЦРТС и узлом связи возможен без разделения каналов, т. е. путем ретрансляции с усилением в видеотракте.

Основная трудность такой «мультиплексной» связи с разделением по времени заключается в том, что время распространения радиоволн между ЦРТС и абонентами, находящимися на разных расстояниях от ЦРТС, неодинаково. И эта разница соизмерима с промежутками времени, отводимыми для каждого канала. Например, пробег в 3 *км* занимает 10 *мксек*. Следовательно, ответные импульсы могут приходить от разных абонентов одновременно, налагаясь друг на друга и нарушая возможность разделения каналов на ЦРТС.

Однако стационарное размещение абонентов позволяет для каждого из них подобрать такие линии задержки, которые компенсируют разницу во времени распространения радиоволн.

Протяженность радиорелейных линий и надежность их действия. Проблема миниатюризации

Принцип ретрансляции позволяет, казалось бы, строить радиолинии любой протяженности. В действительности же для каждого типа радиорелейных станций указывается наибольшая возможная длина линии. Так, система Р-60/120 рассчитана при телевизионной передаче на протяженность линии до 1 000 *км*. Если линию продлить сверх установленного значения, то качество каналов будет ниже требуемого вследствие повышения уровня помех и углубления замираний. Дело в том, что воздействию помех внутреннего и внешнего происхождения подвергаются все приемники радиолинии, и мощности помех суммируются, тогда как мощность принимаемого сигнала определяется только мощностью передатчика соседней станции. Если заданы мощность передатчиков, ширина полосы пропускания (мощность шума пропорциональна полосе) и способ модуляции, то количество ретрансляций, при котором еще сохраняется заданное превосходство сигнала над шумом, окажется ограниченным. Точно также замирания, происходящие вследствие неблагоприятных условий распространения на отдельных участках радиолинии, могут совпадать во времени, так что замирание в оконечном приемнике углубляется. Эти же соображения справедливы и для тропосферных линий.

Но имеется еще один важнейший фактор, с которым приходится считаться при определении максимального допустимого числа интервалов радиорелейной линии. Этот фактор — н а д е ж н о с т ь а п п а р а т у р ы.

Под надежностью радиоэлектронной аппаратуры понимается ее способность безотказно выполнять заданные функции в определенных условиях эксплуатации и в течение определенного времени. Количественно надежность радиорелейной линии характеризуется вероятностью исправной ее работы в течение определенного срока. Линия состоит из ряда станций, включенных между собой последовательно. Неисправность каждой станции прерывает работу всей линии. Значит, с увеличением числа станций надежность уменьшается.

Пусть, например, работа одной станции характеризуется надежностью 0,9 (т. е. имеется 90 шансов из 100 за то, что в течение условленного времени не будет повреждений). Если линия состоит из N таких станций, то общая надежность окажется равной $0{,}9^N$. Так, при четырех станциях мы получим надежность $0{,}9^4 \approx 0{,}65$, т. е. вероятность отсутствия повреждений снизится до 65 шансов из 100.

Но линия, как мы видели, может состоять и из десятков станций. Значит, если общую надежность желательно иметь близкой к единице, то тем более высокие требования нужно предъявить к надежности каждой станции.

В свою очередь каждая станция состоит из многочисленных радиоэлементов — ламп, полупроводниковых приборов, деталей в электрических цепях и т. п. Для повышения общей надежности станции требуется увеличивать надежность ее элементов. Это — первый и основной путь; решение этой задачи возлагается преимущественно на предприятия-поставщики радиоэлементов. Второй путь — профилактический осмотр аппаратуры с целью заблаговременной замены устаревших деталей; эта задача должна решаться персоналом, обеспечивающим эксплуатацию аппаратуры. Наконец, имеется третий путь повышения надежности, путь нежелательный, но во многих случаях неизбежный; это — резервирование отдельных блоков и даже целых стволов радиолинии. Задача определения и введения необходимого и достаточного резерва возлагается на конструкторов радиорелейной аппаратуры. Резервные блоки станции могут включаться вручную или автоматически по показаниям контрольных устройств, свидетельствующим о неисправности основных блоков. Автоматическое резервирование особенно необходимо на необслуживаемых станциях.

Итак, при определении наибольшей протяженности радиорелейной линии приходится считаться и с выполнением требований по качеству воспроизведения информации, и с выполнением требований по надежности работы.

Для перспективной радиорелейной аппаратуры, как и для многих других видов радиоэлектронных устройств, существенный интерес представляет задача миниатюризации. Чем меньше вес и габариты аппаратуры, тем проще ее размещение на борту искусственных спутников-ретрансляторов и других подвижных объектов или же на мачтах в непосредственной близости к антенным устройствам. В аппаратуре радиорелейных станций большинство блоков составляется из элементов и каскадов малой мощности; работа их не связана с большим теплообменом, а потому они допускают широкие возможности миниатюризации.

Процесс миниатюризации развивался успешно на основе применения печатного монтажа, малогабаритных радиоламп и радиодеталей, ферритов, полупроводниковых приборов, что дало и некоторые возможности автоматизации сборки аппаратуры. Но самый принцип составления схем из отдельных элементов, соединяемых между собой с помощью пайки, ставит предел миниатюризации. Если размеры радиодеталей уменьшаются, то сами детали и их соединения становятся, очевидно, более хрупкими и менее надежными. Вместе с тем при усложнении задач, возлагаемых на аппаратуру, возрастает количество составляющих ее деталей. Все это приводит к понижению надежности аппаратуры в целом. Еще достижимой при этом плотностью монтажа оказывается размещение в сред-

нем одной-двух деталей в кубическом сантиметре объема аппаратуры.

Отсюда возникла проблема микроминиатюризации, т. е. разработки такой технологии, при которой плотность монтажа возрастала бы на один или несколько порядков и одновременно достигались бы возможность полной автоматизации сборки и высокая надежность аппаратуры.

Первым шагом микроминиатюризации явилась так называемая микромодульная система технологии радиоэлектронной аппаратуры.

Микромодуль представляет собой блок или, по нашей терминологии, узел аппаратуры, способный выполнять определенную электрическую операцию (например, усилитель, триггер, частотный детектор и т. п.). Все элементы, составляющие микромодуль, должны, помимо требуемых электрических соединений, механически объединяться в монолитное твердое тело путем, например, заливки всех промежутков между ними затвердевающей эпоксидной смолой. Тем самым резко уменьшается вероятность повреждения отдельного элемента внутри микромодуля, и надежность аппаратуры определяется надежностью микромодулей, число которых значительно меньше общего числа входящих в них деталей.

Должно быть определено ограниченное число стандартных микромодулей, из которых можно собрать любую аппаратуру; тогда изготовление каждого типа допустит максимальную автоматизацию, т. е. будет достигнуто снижение стоимости производства.

Микромодуль собирается из стандартных тонких керамических пластинок (галет), имеющих площадь около 1 *см*². На каждой галете крепится одна или несколько сверхминиатюрных деталей (сопротивления, конденсаторы, транзисторы и пр.). Выводы деталей присоединяются печатным способом к контактам на краях галеты. Затем комплект таких пластинок собирают в пачку объемом примерно в 1 *см*³. Нужные контакты галет припаивают к соединительным проволокам, после чего происходит заливка модуля эпоксидной смолой. Аппаратура собирается из типовых модулей, выводы которых на общей изоляционной плате соединяются в нужную схему печатным монтажом. Кубическая форма модулей позволяет оставлять между ними малые зазоры, и плотность монтажа в целом может составить до 10 деталей в кубическом сантиметре.

В качестве показа этапов миниатюризации еще в 1960 г. был опубликован такой пример. Уплотняющее устройство импульсной радиорелейной линии, выполнявшееся на электронных лампах и обычных деталях, занимало несколько стоек-шкафов. Путем перевода на полупроводниковые приборы и печатный монтаж объем этой аппаратуры был уменьшен в 16 раз и составил 77 *дм*³. В микромодульном же исполнении эту аппаратуру оказалось возможным выполнить в объеме 4 *дм*³, т. е. уменьшить еще примерно в 20 раз.

Но микромодульная технология также ограничивает дальнейшие возможности микроминиатюризации. Дальнейшее уменьшение элементов микромодуля бессмысленно, так как объем, занимаемый соединительными проволоками и их спаями внутри микромодуля, становится соизмеримым с объемом самих деталей.

Одна из возможностей дальнейшей миниатюризации открывается микропленочной технологией. Очень тонкие слои (пленки) полупроводниковых, магнитных, диэлектрических и проводящих ма-

териалов могут быть нанесены друг на друга с помощью распыления в вакууме таким образом, что их сочетания будут выполнять определенные электрические операции, например усиление или генерацию электрических колебаний. Между такими слоистыми элементами уже не нужны паяные соединения, благодаря чему объем аппаратуры, составленный из таких блоков, уменьшается даже в сравнении с объемом микромодульной аппаратуры.

Другая, и притом особенно интересная, возможность дальнейшей микроминиатюризации аппаратуры основывается на достижениях физики твердого тела, изучающей тонкие свойства молекул. Небольшой кусочек полупроводникового материала может быть подвергнут таким видам физико-химической обработки, в результате которых он приобретает свойства выполнять определенную электрическую операцию, подобно микромодулю. Но если микромодуль имеет объем около 1 *см*^{3}, то молекулярный блок может быть по размерам равны головке спички [1].

Таковы перспективы миниатюризации радиоэлектронной и, в частности, радиорелейной аппаратуры.

Заключение

Программа нашей партии, принятая XXII съездом, предусматривает дальнейшее развитие всех средств связи. Все районы страны получат хорошую и устойчивую связь и будут охвачены сетью взаимосвязанных телевизионных станций — говорится в Программе.

Эта грандиозная задача будет решаться на основе расширения сети радиорелейных линий всех видов и назначений. Радиорелейные линии наряду с кабельными дают надежные и высококачественные каналы для телеграфной, телефонной связи, телевидения и для систем автоматизированного управления в различных отраслях народного хозяйства.

Линии тропосферной и ионосферной связи имеют большое значение для обмена информацией в труднодсотупных районах с малой плотностью населения.

Развитие всех видов радиорелейной связи базируется на дальнейших научных исследованиях в области распространения радиоволн, в области освоения новых участков их диапазонов, на разработке более совершенных электронных приборов для генерации и усиления и, в частности, усилителей с малым уровнем шумов. Значительную роль в удешевлении эксплуатации и в повышении надежности радиорелейных линий играет автоматизация их аппаратуры, применение современных блоков с полупроводниковыми и ферритовыми элементами. Научные исследования в области антенной техники должны обеспечивать не только улучшение электрических показателей антенных устройств, но и повышение их ветроустойчивости, изыскание мер против обледенения в суровых климатических условиях.

Наконец, немалое значение для решения общей задачи развития радиорелейной связи имеет совершенствование методов строительства и эксплуатации радиорелейных станций.

---

[1] British Communication and Electronics, 1960, Apr., vol. 7, № 4.

ЛИТЕРАТУРА

Бородич С. В., Минашин В. П., Соколов А. В., Радиорелейная связь, Связьиздат, 1960.

Просин А. В., Цветков А. Е., Радиорелейные линии связи, АН СССР, 1958.

Бородич С. В., Калинин А. И., Радиорелейные линии, т. VII Справочника по электросвязи, Связьиздат, 1956.

Грудинская Г. П., Распространение ультракоротких волн, Госэнергоиздат, 1960.

Аронэ М. Н., Метеорная радиосвязь, Воениздат, 1960.

Смирнов В. А., Основы радиосвязи на УКВ, Связьиздат, 1957.

Сорин Я. М., Надежность радиоэлектронной аппаратуры, Госэнергоиздат, 1961.

Сифоров В. И. и Просин А. В., Накопление шумов в релейных линиях однополосной связи, «Радиотехника», 1961, № 8.

Кушнир Ф. В., Шидловский И. А., Возбудитель для частотно-модулируемого передатчика на УКВ, «Электросвязь», 1956, № 2.

Долуханов М. П., Использование ИСЗ для связи на УКВ, «Радио», 1961, № 5.

«Зарубежная радиоэлектроника», 1951—1961.